



**TUGAS AKHIR - TL 141584**

**PENGARUH TEMPERATUR AGING DAN  
WAKTU TAHAN *POST-HEAT* PADA PROSES  
*COPPERIZING* TERHADAP KEKERASAN,  
KETAHANAN KOROSI , SERTA STRUKTUR  
MIKRO BAJA AISI 1006**

**PRADITHA DIKSI ASKARA**  
**NRP 2712 100 136**

Dosen Pembimbing  
Sutarsis, S.T., M.Sc.  
Alvian Toto Wibisono, S.T, M.T.

**JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI**  
**Fakultas Teknologi Industri**  
**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**  
**Surabaya**  
**2016**

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*



**FINAL PROJECT - TL 141584**

**EFFECT OF *AGING* TEMPERATURE AND POST-HEAT HOLDING TIME IN COPPERIZING PROCESS ON HARDNESS, CORROSION RESISTANCE AND MICROSTRUCTURE OF AISI 1006 STEEL**

**PRADITHA DIKSI ASKARA**  
**NRP 2712 100 136**

Advisor  
Sutarsis, S.T., M.Sc.  
Alvian Toto Wibisono, S.T, M.T.

Materials and Metallurgical Engineering Department  
Faculty of Industrial Technology  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2016

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

**PENGARUH TEMPERATUR AGING DAN WAKTU  
TAHAN *POST-HEAT* PADA PROSES *COPPERIZING*  
TERHADAP KEKERASAN, KETAHANAN KOROSI,  
SERTA STRUKTUR MIKRO BAJA AISI 1006**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada

Bidang Studi Metalurgi Manufaktur  
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Material dan Metalurgi  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**PRADITHA DIKSI ASKARA**  
NRP. 2712 100 136

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Sutarsis, S.T., M.Sc ..... (Pembimbing I)
2. Alvian Toto Wibisono, S.T, M.T ..... (Pembimbing II)



## KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT karena atas berkat Rahmat dan Karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan penyusunan Laporan Tugas akhir ini. Penulisan laporan ini diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik. Judul yang penulis ajukan adalah “Pengaruh Tempetatur *Aging* Dan Waktu Tahan *Post-Heat* Pada Proses *Copperizing* Terhadap Kekerasan, Laju Korosi , Serta Struktur Mikro Baja AISI 1006.”

Pada penyusunan Laporan Tugas Akhir ini penulis mendapatkan bimbingan serta bantuan dari banyak pihak, Oleh karena itu dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah S.W.T, yang selalu memberikan nikmat dan karunianya selama penulis hidup di dunia
2. Kedua orang tua beserta keluarga yang telah memberikan doa serta dukungannya.
3. Bapak Sutarsis,S.T.,M.Sc dan Bapak Alvian Toto Wibisono,S.T. M.T selaku dosen pembimbing Tugas Akhir yang telah memberikan bimbingan dan pengajaran yang bermanfaat bagi penulis.
4. Iftitah Tatapangarsa, Angga Septa, Syarif Alamudi dan Ibrahim sebagai teman kelompok yang selalu membantu penulis dalam proses pengerjaan tugas akhir
5. Bapak C. C. Mujiyanto,Bapak A.Chanan, Bapak Sutari dan Ibu Rusalia Istiani atas bantuan teknis selama penelitian
6. Seluruh Mahasiswa Teknik Material dan Metalurgi angkatan 2012 yang selalu memberi semangat kepada penulis.
7. Seluruh pihak yang telah banyak membantu penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari bahwa Laporan Tugas Akhir ini masih banyak kekurangan, karenanya penulis sangat mengharapkan kritik serta saran yang dapat membantu penulis dalam memperbaiki laporan

ini. Penulis berharap laporan ini dapat berguna bagi penulis khususnya dan pembaca pada umumnya

Surabaya, 1 Juli 2016

Penulis

**PENGARUH TEMPERATUR AGING DAN WAKTU  
TAHAN *POST-HEAT* PADA PROSES *COPPERIZING*  
TERHADAP KEKERASAN, KETAHANAN KOROSI ,  
SERTA STRUKTUR MIKRO BAJA AISI 1006**

Nama	: Praditha Diksi Askara
NRP	: 2712100136
Jurusan	: Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS
Dosen Pembimbing	: Sutarsis, S.T.,M.Sc.
Co-Pembimbing	: Alvian Toto Wibisono, S.T, M.T

**Abstrak**

*Baja karbon sudah cukup memuaskan untuk digunakan untuk kebutuhan dalam industri. Penambahan Cu pada baja struktur telah dilakukan untuk meningkatkan ketahanan korosi. Penelitian ini dilakukan penambahan Cu melalui proses difusi pada permukaan baja menggunakan metode copperizing. Setelah itu diberikan proses tambahan yaitu pemanasan pada temperature 1100<sup>0</sup> C. Setelah itu dilakukan proses water quenching. Kemudian dilakukan proses aging pada temperature yang divariasikan. Struktur mikro sampel hasil copperizing adalah quasi-polygonal dan acicular ferrite, Semakin tinggi temperature aging semakin besar ukuran butir sampel, semakin lama waktu post-heat yang diberikan semakin banyak acicular. Kekerasan maksimum berada pada sampel dengan proses copperizing dan diberi post-heat 20 menit dan di-aging pada temperature 400<sup>0</sup> C dengan nilai kekerasan 192.77 HV. Laju korosi saja berkurang dengan adanya proses copperizing karena pada sampel hasil copperizing membentuk lapisan Cu<sub>2</sub>O yang menghambat laju korosi.*

**Kata kunci : difusi, copperizing, microallying, copper**



*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

# **EFFECT OF AGING TEMPERATURE AND POST-HEAT HOLDING TIME IN COPPERIZING PROCESS ON HARDNESS, CORROSION RESISTANCE AND MICROSTRUCTURE OF AISI 1006 STEEL**

Name : Praditha Diksi Askara  
NRP : 2712100136  
Department : Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS  
Advisor : Sutarsis, S.T.,M.Sc.  
Co-Advisor : Alvian Toto Wibisono, S.T, M.T

## **Abstract**

*Low carbon steel is already have many beneficial for industrial need, but in some other way low carbon steel cannot meet the requirement for used.. Each alloying elements give different effect for steel. Cu in structural steel is proved to strengthen its corrosion resistance. In this study addition of Cu is done by diffusion process in steel's surface. After the process copperizing is given an additional process of heating at a temperature 1100<sup>0</sup> C is done and continued with the process of water quenching. Then aging process in to be done in some temperature variation. The microstructure obtained after copperizing process are acicular and quasi-polygonal ferrite. The increasing of aging temperature caused the structure to grow and reduce acicular ferrite content. The longer post-heat temperatur the more acicular ferrite obtained in steel. The highest hardness obtained is at copperizing sampel with 20 minutes post-heat followed with 400<sup>0</sup> C aging temperature, the value is 192.77HV. Corrosion rate of steel decrease in copperized sample, it is caused by Cu<sub>2</sub>O layer formed in the sample's surface.*

**Keyword:** diffusion, copperizing, microalloying, copper

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR ISI

HALAMAN MUKA.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	v
Abstrak.....	vii
KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xix
DAFTAR TABEL.....	xxv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Proses Pemaduan pada Logam.....	5
2.1.1 Metalurgi Serbuk ( <i>Powder Metallurgy</i> ).....	5
2.1.2 Pengecoran ( <i>Casting</i> ).....	6
2.1.3 Microalloying.....	7

2.2 Paduan.....	8
2.2.1 Larutan Padat Interstisial.....	9
2.2.2 Larutan Padat Substitusional.....	10
2.3.1 Jenis Baja Paduan.....	13
2.3.2 Baja HSLA.....	14
2.3.3 Pengaruh Unsur Paduan pada Baja.....	17
2.3.4    Pengelompokan Unsur Paduan Berdasarkan Fungsinya.....	20
2.4 Copper Bearing HSLA.....	21
2.4.1 Sistem biner terbatas: Fe-Cu.....	23
2.4    Baja.....	25
2.5.1 Struktur Mikro Ferrit pada Baja.....	27
2.6 Tembaga.....	33
2.7 Difusi.....	35
2.9 Korosi.....	42
2.10 Passivasi Tembaga.....	44
2.11 Penelitian Sebelumnya.....	45
2.11.1 HSLA 100-Steels Influence Influence of Aging Heat Treatment on Microstructure and Properties.....	45

2.11.2 Transformation Characteristic Structure-Properties Relationship of Cu Bearing HSLA Steel.....	48
2.11.3 Analysis of Copper Effect on Microstructure and Mechanical Properties in Microalloyed Steel.....	49
2.11.4 Pengaruh Short immersing time dan laju pendinginan terhadap <i>microstructure</i> dan perilaku tembaga pada <i>dead mild steel</i> .....	51
2.11.5 Effect of Copper on the Corrosion Properties of Low-Alloy Steel in an Acid Chloride.....	53
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	57
3.1 Diagram Alir.....	57
3.2 Alat dan Bahan Penelitian.....	58
3.2.1. Bahan-bahan Penelitian.....	58
3.2.2. Alat-alat Penelitian.....	58
3.3 Prosedur Penelitian.....	60
3.3.1 Preparasi Sampel.....	60
3.3.2 Pengujian Baja AISI 1006.....	60
3.3.3 Peleburan Tembaga.....	61
3.3.4 Pemanasan Sampel.....	61
3.3.5 Proses Copperizing tanpa Post Heat.....	61

3.3.6 Pengujian Sampel Hasil Copperizing tanpa Post Heat .....	62
3.3.7 Proses Copperizing dengan Post Heat.....	63
3.3.8 Pengujian Sampel Hasil Copperizing dengan Post Heat .....	64
3.3.9 Proses Aging.....	65
3.3.10 Analisis.....	66
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	67
4.1 Hasil Pengamatan Makro.....	67
4.2 Hasil Pengujian X-Ray Diffraction.....	71
4.2.1 Pengujian XRD Baja AISI 1006.....	71
4.2.3 Hasil Pengujian XRD Sampel Copperizing Variasi Waktu <i>Post-Heat</i> yang di- <i>Aging</i> pada Temperatur 500 <sup>0</sup> C.	73
4.2.3 Hasil Pengujian XRD Sampel Copperizing Variasi Waktu <i>Post-Heat</i> yang di- <i>Aging</i> pada Temperatur 600 <sup>0</sup> C.	75
4.2.5 Hasil Pengujian XRD Produk Korosi pada Sampel...	79
4.3 Analisa Hasil Pengujian Struktur Mikro.....	81
4.3.1 Analisa Hasil Pengamatan Struktur Mikro Sampel Copperizing Variasi Waktu Post-Heat yang di-Aging pada Temperatur 400 <sup>0</sup> C.....	81

4.3.2 Analisa Hasil Pengamatan Struktur Mikro Sampel Copperizing Variasi Waktu <i>Post-Heat</i> yang di- <i>Aging</i> pada Temperatur 500 <sup>0</sup> C.....	84
4.3.3 Analisa Hasil Pengamatan Struktur Mikro Sampel Copperizing Variasi Waktu Post-Heat yang di- <i>Aging</i> pada Temperatur 600 <sup>0</sup> C.....	87
4.3.3 Analisa Hasil Pengamatan Struktur Mikro Sampel Copperizing Variasi Waktu <i>Post-Heat</i> yang di- <i>Aging</i> pada Temperatur 700 <sup>0</sup> C.....	90
4.4 Hasil Pengujian Kekerasan <i>Microvickers</i> .....	93
4.5 Hasil Pengujian Tafel.....	96
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	101
5.1 Kesimpulan.....	101
5.2 Saran.....	102
DAFTAR PUSTAKA.....	xxvii
LAMPIRAN.....	xxxi



*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2. 1</b> Proses manufaktur dengan metalurgi serbuk .....	5
<b>Gambar 2. 2</b> Mekanisme Larutan Padat Interstisial.....	9
<b>Gambar 2. 3</b> Mekanisme Larutan Padat Substitusional.....	11
<b>Gambar 2. 4</b> Klasifikasi logam <i>ferrous</i> .....	12
<b>Gambar 2. 5</b> Sistem Fe-Cu. (A) Perhitungan diagram fase lengkap. Garis titik-titik merepresentasikan liquidus untuk <i>metastable miscibility gap</i> . (B) Detail sisi yang kaya Fe, berdasarkan pada perhitungan CVM. Perhatikan ada sedikit perbedaan temperatur eutektoid dibandingkan dengan (A). Komposisi diungkapkan dalam % atom untuk memfasilitasi perbandingan dengan perhitungan diagram Fe-Cu .....	24
<b>Gambar 2. 6</b> Diagram fasa Fe-Fe <sub>3</sub> C .....	26
<b>Gambar 2. 7</b> Diagram CCT untuk baja HSLA yang mengandung 0.06%C, 1.45%Mn, 1.25%Cu, 0.97%Ni, 0.72%Cr, dan 0.42%Mo. PF, poligonal ferit; WF, Widmanstatten ferit; AF; acicular ferit; GF' granular ferit.....	27
<b>Gambar 2. 8</b> Poligonal ferit (struktur terang) dari baja HSLA-80 dengan transformasi isothermal pada 675°C. Martensit (struktur gelap) dibentuk selama pendinginan dalam austenit <i>untransformed</i> setelah ditahan isothermal. Struktur mikro, etsa nital.....	28

Gambar 2. 9 Quasi poligonal ferit yang terbentuk dari baja <i>ultra-low carbon</i> yang mengandung 0.003%C dan 3.00%Mn didinginkan pada 50°C/s. Mikroskop optik.....	29
<b>Gambar 2. 10</b> Diagram CCT Baja dengan Penambahan Unsur Paduan .....	30
<b>Gambar 2. 11</b> Acicular ferit yang terbentuk dengan transformasi isothermal yang mengandung tembaga pada baja HSLA-80 selama 5000s pada 500°C. Mikroskop optik, etsa natal.....	31
<b>Gambar 2. 12</b> Granular ferit yang terbentuk dari pendinginan kontinyu pada baja modifikasi A710 dengan komposisi 0.33%C, 1.44%Mn, 1.20%Cu, 2.19%Ni, 0.67%Cr, dan 0.46%Mo. Mikroskop optik.....	32
<b>Gambar 2. 13</b> (a) Struktur Kristal Tembaga (b) Tembaga.....	33
<b>Gambar 2. 14</b> Skema mekanisme (a) difusi kekosongan (b) difusi intersisial.....	35
<b>Gambar 2. 15</b> Kelarutan karbon dalam besi $\alpha$ .....	39
<b>Gambar 2. 16</b> Skema reaksi anoda dan katoda dalam sel elektrolit.....	44
<b>Gambar 2. 17</b> Variasi Temperatur <i>Aging</i> terhadap Kekerasan HSLA-100.....	46
<b>Gambar 2. 18</b> Mikrograf TEM Baja <i>Water-Quench</i> .....	47
<b>Gambar 2. 19</b> Perilaku <i>aging</i> dari HSLA Copper-Bearing Steels .....	48

<b>Gambar 2. 20</b> Presiptat Cu pada Ferrit (Sadegh, 1994).....	49
<b>Gambar 2. 21</b> Struktur Mikro Baja Hasil Aging (a,b,c) dan Deformasi Dingin(d,e,f).....	50
<b>Gambar 2. 22</b> Mikrostruktur baja AISI 1006 dengan pendinginan <i>quenching</i> menggunakan perbesaran 200x untuk spesimen(a)sebelum <i>copperizing</i> , (b) <i>copperizing</i> 5 menit, (c) <i>copperizing</i> 7 menit .....	51
<b>Gambar 2. 23</b> Hasil Mapping SEM/EDX Sampel <i>Copperizing</i> dengan pendinginan <i>quenching</i> .....	52
<b>Gambar 2. 24</b> Perbandingan luas ukuran butir spesimen baja AISI 1006 setelah <i>copperizing</i> dengan berbagai variasi laju pendinginan.....	53
<b>Gambar 2. 25</b> Pengujian potentiodynamic polarization test .....	55
<b>Gambar 2. 26</b> Proses korosi yang terjadi di permukaan baja dengan pengaruh tembaga.....	56
<b>Gambar 3. 1</b> Diagram Alir Penelitian.....	57
<b>Gambar 4. 1</b> Hasil Pengamatan Makro pada Permukaan Baja AISI 1006 a) AISI 1006 Tanpa <i>Copperizing</i> <i>Cop</i> 10' b) <i>Cop</i> 10' <i>PH</i> 10' c) <i>Cop</i> 10' <i>PH</i> 20' .....	67
<b>Gambar 4. 2</b> Hasil Pengamatan Makro menggunakan mikroskop stereo dengan perbesaran 16x pada penampang melintang Baja AISI 1006 a) Tanpa <i>Copperizing</i> a) <i>Copperizing</i> 10' b) <i>Cop</i> 10' <i>PH</i> 10' c) <i>Cop</i> 10' <i>PH</i> 20' .....	69

<b>Gambar 4. 3</b> Grafik Hasil XRD Baja AISI 1006.....	71
<b>Gambar 4. 4</b> Grafik Hasil XRD Sampel Copperizing Variasi Waktu <i>Post-Heat</i> yang di- <i>Aging</i> pada Temperatur 400 <sup>0</sup> C.....	73
<b>Gambar 4. 5</b> Grafik Hasil XRD Sampel Copperizing Variasi Waktu <i>Post-Heat</i> yang di- <i>Aging</i> pada Temperatur 500 <sup>0</sup> C.....	75
<b>Gambar 4. 6</b> Grafik Hasil XRD Sampel Copperizing Variasi Waktu <i>Post-Heat</i> yang di- <i>Aging</i> pada Temperatur 600 <sup>0</sup> C.....	77
<b>Gambar 4. 7</b> Grafik Hasil XRD Sampel Copperizing Variasi Waktu <i>Post-Heat</i> yang di- <i>Aging</i> pada Temperatur 700 <sup>0</sup> C.....	79
<b>Gambar 4. 8</b> Grafik Hasil XRD Produk Korosi Pada Sampel Copperizing.....	80
<b>Gambar 4. 9</b> Grafik diameter ukuran Butir rata rata sampel yang di Aging pada Temperatur 400 <sup>0</sup> C.....	83
<b>Gambar 4. 10</b> Hasil Pengujian Struktur Mikro pada Sampel Variasi Waktu <i>Post-Heat</i> yang di- <i>Aging</i> selama 1 jam pada Temperatur 500 <sup>0</sup> C a) Tanpa <i>Copperizing</i> b) <i>Copperizing</i> 10' b) <i>Cop</i> 10' <i>PH</i> 10' c) <i>Cop</i> 10' <i>PH</i> 20' .....	84
<b>Gambar 4. 11</b> Grafik diameter ukuran Butir rata rata sampel yang di Aging pada Temperatur 500 <sup>0</sup> C.....	86
<b>Gambar 4. 12</b> Hasil Pengujian Struktur Mikro pada Sampel Variasi Waktu <i>Post-Heat</i> yang di- <i>Aging</i> selama 1 jam pada Temperatur 500 <sup>0</sup> C a) Tanpa <i>Copperizing</i> b) <i>Copperizing</i> 10' b) <i>Cop</i> 10' <i>PH</i> 10' c) <i>Cop</i> 10' <i>PH</i> 20' .....	87

<b>Gambar 4. 13</b> Grafik diameter ukuran Butir rata rata sampel yang di Aging pada Temperatur 600 <sup>0</sup> C.....	89
<b>Gambar 4. 14</b> Hasil Pengujian Struktur Mikro pada Sampel Variasi Waktu <i>Post-Heat</i> yang di- <i>Aging</i> selama 1 jam pada Tempera tur 600 <sup>0</sup> C a) Tanpa <i>Copperizing</i> b) <i>Copperizing</i> 10' b) <i>Cop</i> 10' <i>PH</i> 10' c) <i>Cop</i> 10' <i>PH</i> 20' .....	90
<b>Gambar 4. 15</b> Grafik diameter ukuran Butir rata rata sampel yang di Aging pada Temperatur 700 <sup>0</sup> C.....	92
<b>Gambar 4. 16</b> Hasil Pengujian Struktur Mikro pada Sampel Variasi Waktu <i>Post-Heat</i> yang di- <i>Aging</i> selama 1 jam pada Temperatur 600 <sup>0</sup> C a) Tanpa <i>Copperizing</i> b) <i>Copperizing</i> 10' b) <i>Cop</i> 10' <i>PH</i> 10' c) <i>Cop</i> 10' <i>PH</i> 20' .....	93
<b>Gambar 4. 17</b> Hasil Pengujian <i>Microvickers</i> pada Sampel Variasi Waktu <i>Post-Heat</i> yang di- <i>Aging</i> selama 1 jam.....	94
<b>Gambar 4. 18</b> Kurva perbandingan Hasil pengujian tafel sampel <i>copperizing</i> dan tanpa <i>copperizing</i> pada temperature aging (a.) 400 <sup>0</sup> C (b) 500 <sup>0</sup> C (c)600 <sup>0</sup> C (d)700 <sup>0</sup> C.....	98
<b>Gambar 4. 19</b> Grafik nilai <i>corrosion rate</i> hasil pengujian tafel sampel <i>copperizing</i> dan tanpa <i>copperizing</i> pada temperature aging (a.) 400 <sup>0</sup> C (b) 500 <sup>0</sup> C (c)600 <sup>0</sup> C (d)700 <sup>0</sup> C.....	99

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2. 1</b> Beberapa Jenis Paduan.....	8
<b>Tabel 2. 2</b> Komposisi kimia baja HSLA dengan sistem penamaan dan klasifikasi SAE.....	17
<b>Tabel 2. 3</b> Beberapa Jenis <i>Copper Bearing HSLA Steel</i> .....	22
<b>Tabel 2. 4</b> Komposisi Kimia Baja ASTM A710.....	22
<b>Tabel 2. 5</b> Komposisi Kimia Baja HSLA-80 (wt.%) .....	22
<b>Tabel 2. 6</b> Komposisi Kimia Baja HSLA-100 (wt.%) .....	23
<b>Tabel 2. 7</b> Sifat tembaga pada berbagai komposisi.....	34
<b>Tabel 2. 8</b> Tracer koefisien difusi Cu ke Besi murni.....	38
<b>Tabel 2. 9</b> Komposisi sampel HSLA-100.....	45
<b>Tabel 2. 10</b> Komposisi sampel HSLA-100.....	50
<b>Tabel 2. 11</b> Material uji.....	54
 <b>Tabel 3. 1</b> Rancangan Percobaan.....	 65
 <b>Tabel 4. 1</b> Parameter Elektrokimia Hasil Analisis Kurva Tafel..	 98



*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Dibandingkan dengan paduan tembaga, paduan besi dengan kandungan tembaga masih tergolong hal yang baru saat ini. Dari total produksi tembaga keseluruhan di dunia, masih sangat sedikit yang digunakan dalam *ferrous alloy*. Karena tembaga mempunyai harga yang murah dan hanya dibutuhkan sedikit kandungannya untuk memperoleh sifat mekanik yang diinginkan, maka banyak digunakan sebagai unsur paduan pada baja karbon rendah. Pada awalnya penambahan tembaga hanya digunakan sebagai peningkat ketahanan korosi dari baja itu sendiri, tetapi penelitian lebih lanjut memperlihatkan bahwa penambahan tembaga juga memperbaiki sifat mekanik dari baja. Penggunaan tembaga sebagai unsur paduan memiliki keuntungan seperti meningkatkan kekuatan melalui *precipitation hardening* (Montemarano.1986), Membuat baja mudah di bentuk dan meningkatkan ketangguhan (Wacquez.1967), dan meningkatkan ketahanan terhadap fatigue cracking (LeMay.1971).

Penelitian terhadap presipitasi tembaga pada baja menjadi hal yang sangat penting dalam perkembangan *Cu-Bearing HSLA Steels*. Perlu dilakukan proses *aging* pada temperatur yang sesuai untuk meningkatkan sifat mekanik dari baja yang mengandung Cu, agar Cu dapat meningkatkan kekerasan pada baja. (Gorni.2004)

Pada penelitian ini dilakukan sebuah metode pendifusian Cu ke dalam Baja dengan melakukan proses *immersing* (pencelupan) plat baja AISI 1006 ke dalam *liquid copper*, sehingga terbentuk baja paduan rendah dengan penambahan kadar Cu. Setelah proses pencelupan, baja terlapisi oleh *liquid copper* yang masih menempel pada permukaan kemudian dilakukan pemanasan kembali yang selanjutnya disebut dengan *post-heat* untuk mendifusikan kembali tembaga yang berada pada permukaan baja. Proses selanjutnya adalah dengan melakukan pendinginan cepat pada baja hasil proses *copperizing*, untuk membuat Cu



terperangkap dalam Fe dan membentuk *supersaturated ferrite*. Setelah mengalami pendinginan sampel dipanaskan kembali dengan temperatur *aging* yang divariasikan. Proses pemanasan kembali ini dilakukan untuk mendapatkan nilai kekerasan yang lebih tinggi dari baja hasil *copperizing*, dengan pemanasan kembali dan penahanan pada temperatur yang maksimal dapat meningkatkan kekerasan serta sifat mekanik lain pada baja yang mengandung Cu (Sadegh.1996). Seperti yang dijelaskan sebelumnya bahwa proses *aging* merupakan hal yang harus sangat diperhatikan dalam pembuatan baja paduan rendah dengan kandungan tembaga, maka melalui penelitian ini diharapkan dapat menganalisis temperatur *aging* yang optimal untuk dapat memperoleh kekerasan, pada baja. Selain itu, penelitian ini juga diharapkan dapat menganalisis pengaruh tembaga terhadap sifat ketahanan korosi pada baja, dengan melihat laju korosinya.

### **1.2 Perumusan Masalah**

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh waktu *post-heat* dan temperatur *Aging* terhadap kekerasan *Copperized*-Baja AISI 1006?
2. Bagaimana pengaruh waktu *post-heat* dan temperatur *Aging* terhadap struktur mikro *Copperized*-Baja AISI 1006?
3. Bagaimana pengaruh proses *copperizing* terhadap ketahanan korosi dari Baja AISI 1006?

### **1.3 Batasan Masalah**

Agar diperoleh hasil sesuai dengan yang diinginkan dan tidak menyimpang dari tujuan penelitian, maka dibuat batasan masalah sebagai berikut

1. Pengaruh lingkungan sekitar proses *copperizing* diabaikan
2. Waktu tahan ketika *pre-heat* dianggap sama
3. Temperatur ketika pengangkatan substrat dan pencelupan dianggap konstan
4. Tembaga dianggap leleh sempurna dan temperaturnya konstan



5. Kecepatan pendinginan dianggap konstan

#### **1.4 Tujuan Penelitian**

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh waktu *post-heat* dan temperature *aging* terhadap struktur mikro *copperized*-AISI 1006.
2. Menganalisis pengaruh waktu *post-heat* dan temperature *aging* terhadap kekerasan *copperized*-AISI 1006.
3. Menganalisis pengaruh proses *copperizing* terhadap ketahanan korosi dari Baja AISI 1006.

#### **1.5 Manfaat Penelitian**

Penelitian ini bermanfaat untuk mengetahui waktu *post-heat* yang tepat dalam melakukan proses *copperizing* sehingga memperoleh difusi Cu yang maksimal serta mengetahui temperature yang sesuai dalam melakukan proses *aging* untuk meningkatkan kekerasan baja hasil *copperizing* sehingga diperoleh sifat mekanik yang baik dalam proses *copperizing*. Selain itu penelitian ini juga bermanfaat untuk mengetahui pengaruh *copperizing* terhadap ketahanan korosi pada baja AISI 1006.



*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



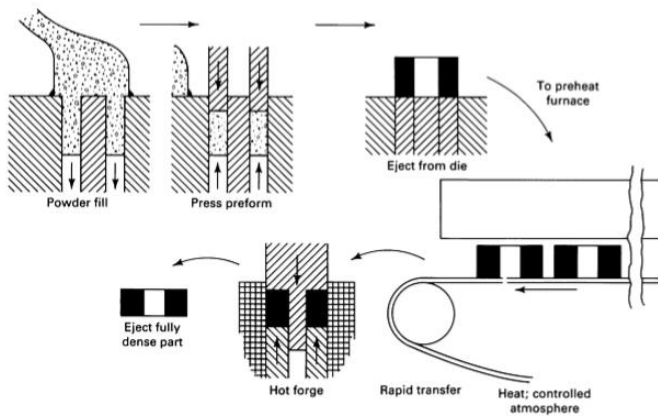
## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Proses Pemaduan pada Logam

##### 2.1.1 Metalurgi Serbuk (*Powder Metallurgy*)

Metalurgi serbuk adalah sebuah metode pada pembentukan logam *ferrous* ataupun *non-ferrous* dengan mencampurkan serbuk dari unsur ataupun paduan dan melakukan kompaksi campuran tersebut pada sebuah cetakan. Kemudian pada hasil dari proses tersebut dilakukan sintering pada *furnace* yang diatur keadaan atmosfernya untuk membentuk ikatan padapartikel tersebut.



**Gambar 2. 1** Proses manufaktur dengan metalurgi serbuk  
(James,2015)

Metalurgi serbuk memiliki banyak keuntungan, dalam proses ini energi dan material yang digunakan lebih efisien bila dibandingkan dengan proses pemrosesan logam yang lain.



Metalurgi serbuk juga relatif lebih hemat biaya dalam membentuk bagian logam yang memiliki bentuk yang kompleks dan juga mengurangi proses *machining* tambahan. Material yang dapat dibentuk juga memiliki banyak variasi, dengan melakukan pemilihan material yang sesuai dapat dibentuk pula struktur mikro yang diinginkan dengan mudah. Hasil Metalurgi serbuk memiliki permukaan yang baik dan dapat diberi perlakuan panas untuk meningkatkan kekuatan ataupun ketahanan ausnya. (James, 2015)

### **2.1.2 Pengecoran (*Casting*)**

Proses pengecoran adalah salah satu proses yang sederhana dan proses langsung untuk mendapatkan bentuk yang diinginkan. Proses ini membutuhkan cetakan yang diinginkan sesuai bentuk dan logam cair. Pengecoran yang biasa dilakukan adalah penuangan logam cair ke cetakan pasir. Tujuan dari proses pengecoran ini adalah memproduksi produk yang digunakan manusia. (Sudjana, 2008).

Dalam berbagai hal benda-benda kerja yang dibentuk melalui proses pengecoran memiliki keunggulan baik sifat maupun efisiensinya pembentukannya, bahkan tidak dimiliki oleh bahan yang dibentuk dengan cara lain, misalnya pada besi/baja tempa, dimana benda-benda tuangan (hasil pengecoran) sifat-sifatnya dapat ditentukan oleh formulasi campuran dan dapat diperbaiki menurut kebutuhan kita, bentuk dan dimensinya dapat dibentuk melalui pengecoran ini, misalnya rongga rongga, saluran-saluran dan lain-lain yang mungkin tidak dapat dilakukan dengan cara lain, dengan demikian benda tuangan berkembang sejalan dengan modernisasi teknologi itu sendiri hal ini dikarenakan benda tuangan memiliki keunggulan dan dapat diterima diberbagai jenis produk, seperti permesinan, automotif, listrik dan elektronik, konstruksi/ bangunan gedung, asesoris dan lain-lain. Namun





demikian jika kita lihat industri manufaktur yang bergerak dibidang pengecoran ini jumlahnya masih kecil dengan kualitas produknya pun masih rendah walaupun ada produk dengan kualitas tinggi tetapi masih dengan teknologi luar negeri. Hal ini menjadi tantangan bagi kita semua agar dapat berkompetisi dengan bangsa lain terutama dalam era globalisasi seperti sekarang ini (Sudjana, 2008).

### 2.1.3 Microalloying

Teknologi *microalloying* pada baja telah dikembangkan sekitar 25 tahun, dan memberikan pengetahuan tentang mekanisme *precipitation hardening*, *grain size control* dan proses deformasi pada baja. Kata *microalloying* digunakan karena baja dipadukan dengan unsur paduan lain yang memiliki kadar 0.05% hingga 0.15%, dari proses ini mengakibatkan baja memiliki sifat mekaniki yang lebih baik seperti:

1. Ukuran butir austenite/ferrite berkurang, sehingga kekuatan dan ketangguhan baja meningkat, selain itu juga temperatur transisi ulet-getas baja berkurang
2. Ketika terjadi *precipitation hardening*, kekuatan dan ketangguhan baja meningkat, selain itu juga temperatur transisi ulet-getas baja berkurang
3. *Hardenability* baja meningkat dan temperature transisi austenite/ferrite menurun
4. Kadar oksigen dan sulfur terlarut pada baja a berkurang sehingga meningkatkan kemurnian baja
5. Meningkatkan *machinability* baja

Baja yang dibuat dengan menggunakan proses *microalloying* menjadi salah satu kategori baja yang paling banyak digunakan di dunia yaitu sekitar 12% dari total penggunaan semua jenis baja di dunia. Baja jenis ini digunakan dalam berbagai sektor



industri dan juga telah menjadi kunci utama dalam pengembangan industri transportasi, konstruksi dan *oil and gas*. (Morris, 2012)

## 2.2 Paduan

Paduan adalah material logam yang dibuat dengan mencampurkan dua atau lebih logam cair. Paduan digunakan untuk berbagai macam tujuan, seperti konstruksi, transportasi dan pada industri elektronik. Pada table dibawah ini adalan contoh dari beberapa jenis paduan

**Tabel 2. 1** Beberapa Jenis Paduan (Mihaela, 2001)

Alloy	Mass percentage composition
<i>brass</i>	up to 40% zinc in copper
<i>bronze</i>	a metal other than zinc or nickel in copper (casting bronze: 10%Sn and 5% Pb)
<i>cupronickel</i>	nickel in copper (coinage cupronickel: 25% Ni)
<i>pewter</i>	6% antimony and 1,5% copper in tin
<i>solder</i>	tin and lead
<i>stainless steel</i>	more than 12% chromium in iron

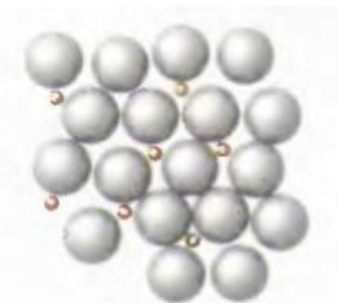
Pada paduan homogen, atom dari unsur yang berbeda terdistribusi secara *uniform*. Contoh paduan homogen adalah brass dan bronze. Paduan heterogen, seperti *tin-lead* terdiri dari campuran fasa Kristal dengan komposisi yang berbeda. Struktur dari paduan lebih kompleks bila dibandingkan dengan logam murni karena paduan terdiri dari dua atau lebih atom dari unsur yang berbeda dan memiliki jari-jari atom yang berbeda juga. (Mihaela, 2001)

Saat logam cair dipadukan dengan dengan unsur lain, dapat terjadi mekanisme yang berbeda yang dapat membentuk paduan tersebut. Mekanisme yang terjadi tersebut bergantung pada jari jari atom dari unsur yang dipadukan. Kedua mekanisme tersebut adalah interstisial dan substitusional. (Bhardwaj, 2008)



### 2.2.1 Larutan Padat Interstisial

Larutan padat interstisial ini terbentuk bila atom dengan diameter yang sangat kecil dapat masuk di rongga antar atom dalam struktur kristal dari solvent dengan diameter atom yang sangat besar. Karena celah (rongga) antar atom dalam suatu struktur kristal sangat kecil maka hanya atom yang sangat kecil yang dapat menyisip dan membentuk larutan padat interstisial. Atom tersebut adalah hydrogen, boron, carbon, nitrogen, dan oksigen. Larutan padat, interstisial kelarut padatnya sangat terbatas dan biasanya juga tidak penting, kecuali larutan padat karbon dalam besi, yang sangat banyak mempengaruhi struktur dan sifat baja. Larutan padat interstisial maupun substitusional memiliki struktur Kristal yang terdistorsi. Distorsi ini berikutnya menimbulkan tegangan di sekitar dan menghambat gerakan dislokasi pada bidang slip, sehingga untuk menghasilkan slip diperlukan gaya yang lebih besar. Karena itu adanya solute atom menaikkan kekuatan dan kekerasan. Semakin banyak solute atom maka membuat kekuatan dan kekerasan makin tinggi.



**Gambar 2. 2** Mekanisme Larutan Padat Interstisial (Mihaela, 2001)



### 2.2.2 Larutan Padat Substitusional

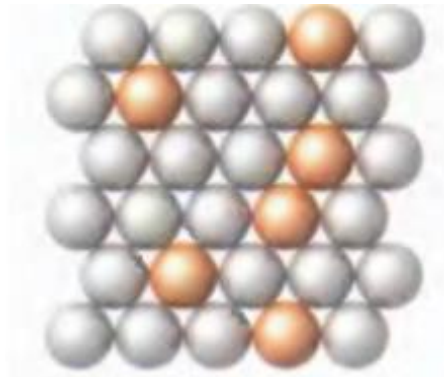
Pada paduan substitusional atom *solute* menggantikan tempat atom solvent dalam struktur kristal *solvent*. Jumlah maksimum atom *solute* yang menggantikan *solvent* dapat tidak terbatas, paduan dapat dibuat dengan segala komposisi.

Pada sistem paduan ini ada beberapa factor yang memengaruhi kelarutan, yaitu:

1. *Crystal Structure Factor*, kemampuan membentuk larutan padat dengan segala komposisi(kelarut-padatan sempurna), tidak terjadi bila kedua unsurnya memiliki struktur Kristal yang tidak sama.
2. *Relative Size Factor*, Terbentuknya suatu larutan padat mudah terjadi bila perbedaan atom tidak terlalu besar, tidak lebih dari 15%. Bila perbedaannya terlalu besar maka kelarut padatannya sangat terbatas. Misalnya pada timbal dengan perak yang memiliki perbedaan diameter 20 % maka kelarut padatan timbal dalam perak hanya sekitar 1.5 %, sedangkan kelarut-padatan perak dalam timbal malah hanya 0.1 5. Antimon dan bismuth dapat saling melarutkan pada segala komposisi, kelarut-padatannya tidak terbatas, karena diameter atomnya 7 % dan struktur kristalnya sama. Sedangkan kelarutan antimony dan aluminium dengan perbedaan diameter atom 2 %, hanya 0.1% karena struktur kristalnya tidak sama.
3. *Chemical Affinity Factor*, Makin besar *chemical affinity* antara dua logam makin kecil kemungkinan membentuk sebuah larutan padat, mereka cenderung lebih membuat senyawa. Biasanyamakin jauh jarak letak antara dua unsur dalam table periodik makin besar pula *chemical affinity* antara keduanya.



4. *Relative- Valence Factor*, bila *solute metal* memiliki valensi berbeda dari solvent maka jumlah atom electron valensi per atom berubah dan struktur Kristal lebih peka terhadap penurunan rasio electron daripada terhadap kenaikannya. Jadi dengan kata lain logam bervalensi lebih rendah dapat melarutkan lebih banyak logam bervalensi lebih tinggi daripada sebaliknya. Misalnya dalam system aluminium-nikel, keduanya fcc, *relative size factor* 14%. Aluminium bervalensi lebih tinggi, kelarutannya dalam nikel mencapai 5 %, tetapi aluminium hanya mampu melarutkan 0.04 % nikel. (Suherman, 1999)

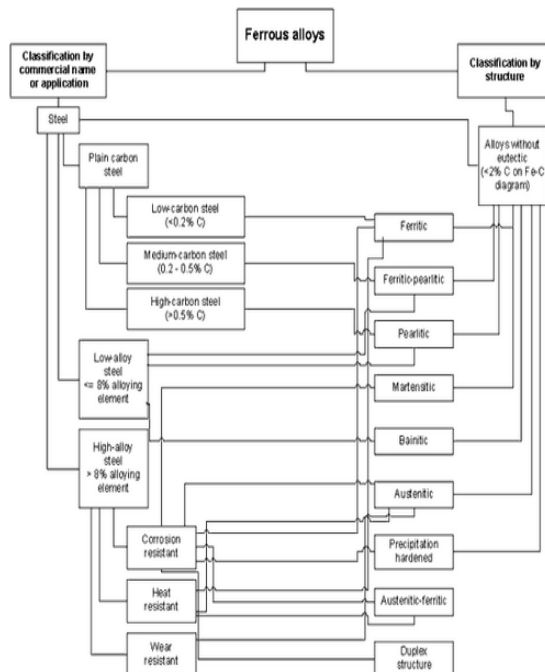


**Gambar 2. 3** Mekanisme Larutan Padat Substitusional (Mihaela, 2001)



## 2.3 Baja Paduan

Secara unsur pematunya baja dibedakan menjadi dua jenis baja yaitu baja (*plain carbon steel*) dan baja paduan (*alloy steel*). Masing masing jenis tersebut digunakan dengan tujuan yang berbeda. Umumnya baja paduan dibuat untuk memperbaiki sifat mekanik baja karbon dengan menambahkan unsur paduan lain. Unsur-unsur yang ditambahkan tersebut biasanya logam. Pematuan pada baja karbon dilakukan untuk mendapatkan sifat-sifat tertentu yang tidak terdapat pada baja karbon (Schreder, 2007)



**Gambar 2. 4** Klasifikasi logam *ferrous* (Total Materia, 2013)



### 2.3.1 Jenis Baja Paduan

Seperti yang diperlihatkan pada gambar 2. sebelumnya baja paduan dibedakan menjadi dua jenis yaitu baja paduan rendah (*low-alloy steel*) dan baja paduan tinggi. Secara umum perbedaan jenis baja paduan ini terletak pada jumlah dari kadar penambahan unsur paduan baja.

#### 1. Baja Paduan Rendah (*Low Alloy Steel*)

Baja Paduan rendah memiliki sifat mekanik yang relative lebih baik bila dibandingkan dengan baja karbon sebagai akibat dari adanya penambahan unsur paduan seperti nikel, kromium dan molybdenum. Jumlah penambahan unsur pada baja paduan rendah ini berkisar antara 2.07% hingga sedikit dibawah stainless steel yang mengandung >10% Cr.

Pada banyak baja paduan rendah, kegunaan utama unsur paduan adalah untuk meningkatkan sifat mekanik baja setelah diberikan perlakuan panas. Pada kasus tertentu penambahan unsur juga digunakan untuk mengurangi pengaruh lingkungan pada kondisi yang diinginkan. Seperti halnya pada baja secara umum, baja paduan rendah juga dapat diklasifikasikan berdasarkan :

1. Komposisi kimia, seperti baja nikel, baja nikel-krom, baja molybden, dan baja krom-molybden
2. Perlakuan panas, seperti *quenched and tempered*, *normalized*, dan *annealed*

#### 2. Baja Paduan Tinggi (*High Alloy Steel*)

Merupakan baja dengan unsur paduan yang ditambahkan dengan kadar yang lebih tinggi yaitu > 10 %, baja ini memiliki fungsi khusus sama halnya dengan baja paduan rendah. Baja jenis ini umumnya digunakan untuk meningkatkan ketahanan terhadap



korosi. Contoh yang paling umum dari baja jenis ini adalah *stainless steel*. (Total Materia, 2013)

### 2.3.2 Baja HSLA

Baja HSLA diproduksi dalam berbagai jenis plat, dan *structural shapes* dengan kekuatan Tarik bervariasi antara 290 hingga 690 MPa. Baja HSLA memiliki banyak kegunaan seperti dalam konstruksi jembatan, platform dalam industri *oil and gas*, dalam industri perkapalan serta pada industri industri lain.

*High-strength low-alloy (HSLA) steels* dibuat dengan tujuan memberikan sifat mekanik atau ketahanan korosi yang lebih tinggi terhadap *atmospheric corrosion* bila dibandingkan dengan baja karbon rendah biasa. Kekuatan Tarik yang lebih tinggi dapat diperoleh dengan penambahan  $\leq 0.1\text{wt}\%$  N, Nb, V, Ti, dan atau Zr (micro-alloying) yang membentuk presipitasi karbida, dan juga dengan mengontrol proses pembentukan butir pada mikro struktur.

Baja HSLA mengandung 0.05 hingga 0.25wt%C,  $\leq 2\text{wt}\%$  Mn dan Cr, Ni, Mo, Cu sebagai unsur paduan lainnya. *Tensile Strength* baja HSLA adalah sekitar  $\geq 275\text{MPa}$ . Baja HSLA biasanya dibuat menggunakan proses *hot-rolled*.

Umumnya HSLA ditemukan di dalam produk-produk yang telah dilakukan mechanical treatment sebelumnya seperti dalam bentuk lembaran, billet, atau bentuk structural lainnya. Hal tersebut dimaksudkan guna mendapatkan sifat mekanik yang jauh lebih baik lagi. Perlakuan tersebut antara lain sebagai berikut:

- *Controlled rolling* pengerasan akibat presipitasi HSLA digunakan untuk mendapatkan butiran austenite yang lebih murni, selain itu butiran austenite yang murni nantinya mempermudah butiran untuk dideformasi, sehingga selama pendinginan terjadi dari butiran austenite menjadi





butiran ferit terjadi kenaikan kekuatan tarik yang cukup signifikan.

- *Accelerated cooling* sebenarnya HSLA yang diroll cenderung menghasilkan butiran ferit murni selama proses pendinginan dari austenite. Tetapi kecepatan pendinginan yang terlalu tinggi kadang tidak cukup untuk membentuk ferit seutuhnya, di sisi lain apabila pendinginannya terlalu lambat justru menimbulkan overaging terhadap presipitat.
- *Quenching or accelerated air or water cooling* terhadap baja karbon rendah ( $<0.08\%C$ ). Mikrostruktur ini memberikan efek kombinasi yang baik terutama pada kekuatan (275 sampai 690 MPa, atau 60 sampai 100 ksi), weldability dan formability, serta kekakuannya.
- *Normalizing* HSLA yang mengandung vanadium untuk menata ulang ukuran butir, sehingga dapat memperbaiki kekakuan dan kekuatan.
- *Intercritical annealing* HSLA (dan juga baja yang mengandung mangan dengan carbon rendah) untuk menghasilkan mikrostruktur yang dual-phase (martensit-martensit yang dikelilingi matriks ferit). Mikrostruktur ini memang menghasilkan kekuatan yang lebih rendah, tetapi justru HSLA jenis ini mempunyai kombinasi kekuatan dan keuletan yang lebih baik dibandingkan HSLA konvensional lainnya. (Martienssen, 2008)

Baja HSLA dibagi menjadi beberapa kategori berdasarkan penambahan unsur paduan dan proses produksi tertentu, seperti *rolling*, *forging*, dll, untuk mendapatkan sifat-sifat mekanik tertentu, yaitu penambahan kekuatan, ketangguhan, *formability*, *weldability*, dan ketahanan korosi. (ASM International, 2001)

Baja HSLA dibagi menjadi enam kategori sebagai berikut:



- *Weathering steels*, yaitu baja HSLA yang memiliki unsur paduan berupa tembaga dan fosfor dalam jumlah sedikit. Hal tersebut meningkatkan ketahanan baja terhadap *atmospheric corrosion* dan penguatan pada *solid solution*.
- *Microalloyed ferrite-pearlite steels*, yaitu baja HSLA yang memiliki unsur paduan berupa pembentuk *carbide* atau *carbonitride*, seperti Nb, V, dan/atau Ti dengan jumlah kurang dari 0.10%. Unsur-unsur paduan tersebut menyebabkan *precipitation hardening* dan *grain refinement* yang meningkatkan kekuatan dan kekerasan baja.
- *As-rolled pearlitic steels*, termasuk didalamnya adalah baja *carbon-manganese*, tetapi juga ditambahkan sejumlah kecil unsur paduan lainnya untuk meningkatkan kekuatan, ketangguhan, *formability*, dan *weldability*.
- *Acicular ferrite (low-carbon bainite) steels*, yaitu baja HSLA dengan kadar karbon rendah ( $< 0.05\%$  C). Baja ini memiliki kekuatan *yield* yang tinggi (690 MPa) dan *weldability*, *formability*, dan ketangguhan yang baik.
- *Dual-phase steels*, yaitu baja HSLA yang memiliki struktur mikro *martensite* yang tersebar dalam matriks *ferrite*. Baja ini memiliki kombinasi yang baik antara keuletan dan kekuatan tarik yang tinggi.

SAE melakukan penamaan dan klasifikasi baja HSLA untuk aplikasi bidang otomotif. Baja HSLA di-klasifikasikan sesuai dengan *yield strength* minimumnya. Sistem klasifikasi SAE yang terbaru untuk baja HSLA terdiri dari tiga angka yang mana merupakan kode yang mewakili nilai minimum *yield strength* dalam satuan ksi. Sebagai contoh, kode 080 berarti nilai minimum *yield strength*-nya adalah 80 ksi (552 MPa). Setelah angka, terdapat satu atau lebih huruf yang men-deskripsikan komposisi kimia, kandungan karbon, atau *deoxidation practice*. Untuk komposisi kimia, digunakan huruf S (*structural quality*), L (*low-*



*alloy*), atau W (*weathering*). Untuk kadar karbon, digunakan huruf K (*killed*), F (*killed* ditambah *inclusion control*), atau H (*high*). Untuk deoksidasi pada baja, digunakan huruf K (*killed*), F (*killed* ditambah *inclusion control*), atau O (*non-killed*). Sebagai contoh, SAE grade 080XLK yang berarti sebuah baja *low-alloy* (X), *low-carbon* (L), *killed* (K) *steel* dengan nilai minimum *yield strength* 80 ksi (552 MPa).

**Tabel 2. 2** Komposisi kimia baja HSLA dengan sistem penamaan dan klasifikasi SAE. (Bramfitt, 2002)

SAE designation	Content, %		
	Carbon	Manganese	Other
050XLK	0.23 max	1.35 max	Cb, V
060XLK	0.26 max	1.45 max	Cb, V, N
070XLK	0.26 max	1.65 max	Cb, V, N
080XLK	0.26 max	1.65 max	Cb, V, N

Penamaan baja HSLA yang lain adalah penamaan dengan standar AISI. Perbedaan antara sistem penamaan dan klasifikasi HSLA AISI dengan SAE adalah pada AISI tidak memakai kandungan karbon, tetapi ditambahkan nilai kekuatan dan baja *dual-phase*. Untuk baja *dual-phase* yang memiliki 10-20% volume *martensite* di matriks *ferrite* memiliki penamaan D. Selain itu, baja *dual-phase* di-klasifikasikan berdasarkan nilai minimum *tensile strength*, tidak seperti baja HSLA lainnya yang menggunakan klasifikasi berdasarkan nilai minimum *yield strength*. Sebagai contoh, baja AISI DF090T berarti baja *dual-phase* (D), *killed steel* dengan *inclusion control* (F), dan memiliki nilai minimum kekuatan tarik (T) 90 ksi (620 MPa). (Bramfitt, 2002)

### 2.3.3 Pengaruh Unsur Paduan pada Baja



Baja karbon biasanya sudah cukup memuaskan untuk digunakan bila persyaratan kekuatan dan, keuletan dan lain lain tidak terlalu tinggi, baja karbon juga cukup baik untuk digunakan pada temperature kamar dan pada kondisi lingkungan yang tidak terlalu korosif dan harganya pun relative murah. Tetapi dalam beberapa hal baja karbon tidak memenuhi syarat untuk dipergunakan.

Baja karbon dapat mencapai kekuatan yang tinggi dengan menaikkan kadar karbonnya, tetapi ini sangat menurunkan keuletan dan ketangguhannya. Kekuatannya banyak berkurang bila bekerja pada temperature yang agak tinggi. Pada temperature rendah ketangguhannya menurun cukup drastic. Baja karbon mempunyai *hardenability* yang umumnya agak rendah, dan setelah pengerasan mudah menjadi lunak kembali bila mengalami pemanasan. Hal-hal ini sering merupakan hambatan/kesulitan dalam penggunaan baja karbon

Dengan menambahkan satu atau beberapa unsur paduan tertentu maka banyak kesulitan tersebut dapat diatasi.

Pengaruh unsur paduan terhadap baja banyak dipengaruhi oleh cara penyebarannya didalam konstituen baja itu. Pada dasarnya semua unsur paduan, sedikit atau banyak dapat larut dalam ferit dan austenite pada umumnya dapat melarutkan unsur paduan dalam kadar yang lebih tinggi. Sebagian dari unsur unsur dalam baja cenderung membentuk karbida, ada yang kecenderungannya tinggi ada pula yang rendah, bahkan ada yang tidak pernah dijumpai sebagai karbida.

Sekitar 26 unsur digunakan dalam pembuatan baja paduan. Berikut dijelaskan masing masing kegunaan dalam pemaduan baja menggunakan berbagai jenis unsur.

Kromium (Cr)



Kromium digunakan untuk meningkatkan kekerasan serta ketangguhan baja. Kromium juga membuat butir baja menjadi halus sehingga baja tahan korosi, tegangan, dan goresan.. Kromium juga merupakan bahan utama dalam pembuatan *stainless steel*. Pada *stainless steel* mengandung 11% hingga 26% kromium

Tungsten (W)

Tungsten adalah logam berwarna putih yang langka dan berat serta memiliki titik lebur yang sangat tinggi. Tungsten dapat meningkatkan kekerasan pada baja serta dapat memberikan baja ketahanan terhadap panas yang tinggi. Tungsten biasa di gunakan dalam pembuatan *tool steel*, *high speed steel* dan pada *cemented carbide*

Nikel (Ni)

Nikel meningkatkan kekuatan serta ketangguhan pada baja. Baja yang mengandung Nikel tidak mudah mengalami korosi serta memiliki kekuatan dan kekerasan yang tinggi. Selain itu adanya nikel membuat baja lebih elastis. Baja dengan kandungan nikel biasa digunakan sebagai *shaft*, rel baja, dll

Vanadium (V)

Vanadium adalah logam berwarna keabuan yang memiliki sifat getas dan tahan terhadap korosi. Vanadium memberikan baja butir yang halus sehingga meningkatkan kekuatan dan ketangguhan pada baj. Baja vanadium dapat menahan tegangan yang sangat besar sehingga biasa dipakai sebagai *spring* dan bagian lain yang mengalami banyak getaran dalam keadaan kerjanya.

Kobalt (Co)

Kobalt adalah logam penting yang digunakan dalam pembuatan alat pemotong (*cutting tool*). Kemampuan utama kobalt adalah menambahkan kekerasan pada alat potong saat dalam kondisi panas. Kemampuan kobalt ini disebut dengan kemampuan dalam menaikkan *hot-hardness*. selain itu kobalt juga mningkatkan



ketahanan aus pada baja. Kobalt ditambahkan pada baja dengan kadar 5% hingga 15 %. (Total Materia, 2013)

### 2.3.4 Pengelompokan Unsur Paduan Berdasarkan Fungsinya

1. Pembentuk/pen-stabil *ferrite*: unsur paduan yang membuat *ferrite* menjadi lebih stabil sampai ke temperatur tinggi. Hampir semua unsur paduan mempunyai sifat ini, kecuali *nickel* dan *mangan*. Unsur paduan yang penting pada kelompok ini adalah Cr, Si, Mo, W, dan Al.
2. Pembentuk/pen-stabil *austenite*: unsur paduan yang membuat *austenite* menjadi lebih stabil pada temperatur yang lebih rendah. Unsur yang terpenting pada kelompok ini adalah Ni dan Mn.
3. Pembentuk karbida: unsur paduan yang di dalam baja dapat membentuk karbida. Beberapa pembentuk karbida yang penting (diurut mulai dari yang kurang kuat) adalah: Cr, W, Mo, V, Ti, Nb, Ta, dan Zr. Karbida yang terbentuk ini dapat berupa karbida sederhana atau karbida kompleks. Adanya karbida menaikkan sifat tahan aus baja.
4. Pen-stabil karbida: unsur paduan yang membuat karbida menjadi lebih stabil, tidak mudah terurai dan larut ke dalam suatu fase. Unsur-unsur dalam kelompok ini (diurut dari yang lemah ke kuat): Co, Ni, W, Mo, Mn, Cr, V, Ti, Nb, dan Ta.
5. Pembentuk nitrida: unsur paduan yang dapat membentuk nitrida. Pada dasarnya semua unsur paduan pembentuk karbida adalah juga pembentuk nitrida (yang dapat membentuk nitrida bila dilakukan *nitriding*). Selain itu, aluminium juga merupakan pembentuk nitrida yang cukup kuat. Nitrida merupakan senyawa yang sangat keras



sehingga adanya senyawa ini dapat menaikkan kekerasan baja. (Suherman, 2003)

## **2.4 Copper Bearing HSLA**

Keuntungan penggunaan baja HSLA membuktikan bahwa kombinasi antara kekuatan, ketangguhan dan *weldability* dapat ditemukan dalam baja dengan penggunaan biaya yang minimal. Hasil penggunaan HSLA pun membuktikan adanya peningkatan kekuatan mekanik dari material serta ketahanan terhadap pertumbuhan perambatan retak.

Pada dasarnya baja HSLA adalah baja karbon rendah dengan penambahan 1.5% mangan, dan diperkuat dengan sedikit penambahan unsur unsur lain seperti niobium, vanadium, atau titanium dan pada keadaan tertentu menggunakan teknik tambahan seperti *rolling* dan perlakuan panas. Penelitian dengan penambahan Cu pada baja struktur telah dilakukan untuk meningkatkan ketahanannya terhadap korosi, baja jenis ini digunakan pada berbagai macam industri. Baja HSLA dengan tambahan Cu sebagai unsur paduan terbukti dapat meningkatkan kekuatan dengan adanya presipitat, tetapi bias mempertahankan ketangguhannya, *weldability*, ketahanan korosi serta *machinability* pada temperature rendah.



**Tabel 2. 3** Beberapa Jenis *Copper Bearing HSLA Steel*  
(Total Materia, 2013)

Class	Process route			Thickness, [mm]	Specification		
	Step 1	Step 2	Step 3		YS, [MPa]	TS, [MPa]	A, [%]
1	As rolled	Precipitation Hardened (Age 540-650°C)	-	4.8-7.9 >7.9-19	585 550	655 655	20 20
2	Normalised in the range 870-930°C	-	-	4.8-25 >25-51 >51	450 415 380	495 495 450	20 20 20
3	Austenitised in the range 870-930°C	Water Quenched	Precipitation Hardened (Age 540-650°C)	4.8-51 >51	515 450	585 515	20 20

Baja ASTM A710, HSLA-80, dan HSLA-100 merupakan HSLA *Copper-bearing Steels*, berikut merupakan komposisi kimia dari baja-baja tersebut:

**Tabel 2. 4** Komposisi Kimia Baja ASTM A710 (Dhua, 2000)

C	Cu	Ni	Cr	Mo	Nb
0.07wt.%	1.00 wt.%	0.7 wt.%	0.2 wt.%	0.04 wt.%	0.04 wt.%

**Tabel 2. 5** Komposisi Kimia Baja HSLA-80 (wt.%) (Wilson, 2006)

C	M n	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Si	Nb
0.0 5	0.5	0.00 9	0.00 2	1.1 2	0.8 8	0.7 1	0.2 0	0.2 8	0.03 5



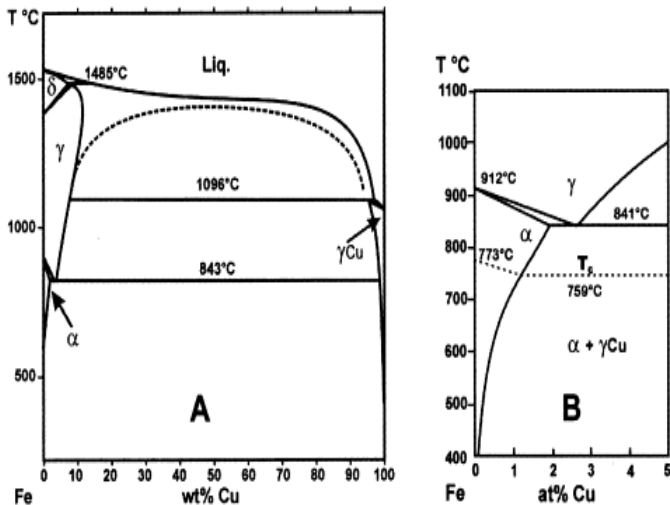


**Tabel 2. 6** Komposisi Kimia Baja HSLA-100 (wt.%) (Mujahid, 1993)

C	M n	Ni	Cr	C u	M o	Nb	Si	Al	N	P	S
0.0 36	0. 91	3. 59	0. 59	1. 60	0. 59	0.0 25	0. 24	0.0 22	0.00 97	0.0 06	0.0 05

#### 2.4.1 Sistem biner terbatas: Fe-Cu

Hanya fase  $\delta$ -Fe,  $\alpha$ -Fe,  $\gamma$ -Fe dan  $\gamma$ -Cu. Diagram yang lengkap ditunjukkan pada Gambar 2.12 yang merupakan hasil dari data *optimisation* dan perhitungan menggunakan Thermocalc baru-baru ini. Dibawah kondisi ekuilibrium, liquid adalah fase tunggal, tetapi beberapa penulis melaporkan cenderung untuk membentuk *metastable miscibility gap*. Tentu saja, ini dapat diprediksi dengan perhitungan dan ditunjukkan oleh garis titik-titik dalam Gambar 2.12-A. Representasi yang lebih detail pada sisi yang kaya Fe dalam Gambar 2.12-B yang juga ditentukan oleh data *optimisation*, diikuti dengan perhitungan dasar CVM. Kelarutan tembaga dalam besi sangat kecil pada temperatur rendah (Durand, 2003).



**Gambar 2. 5** Sistem Fe-Cu. (A) Perhitungan diagram fase lengkap. Garis titik-titik merepresentasikan liquidus untuk *metastable miscibility gap*. (B) Detail sisi yang kaya Fe, berdasarkan pada perhitungan CVM. Perhatikan ada sedikit perbedaan temperatur eutektoid dibandingkan dengan (A). Komposisi diungkapkan dalam % atom untuk memfasilitasi perbandingan dengan perhitungan diagram Fe-Cu (Durand, 2003).

Tembaga dan besi terlarut sempurna dalam kondisi lebur. Ketika sedikitnya 0,1 wt.% karbon terdapat dalam besi, kemampuan larut sempurna tidak terjadi. Selama solidifikasi, sekitar 10 wt.% tembaga ditahan dalam *solid solution* substitusi dengan besi delta dan gamma. Bagaimanapun, selama transformasi menjadi besi alfa, kemampuan untuk larut menurun (hanya untuk 2 atau 3 wt.%), dengan demikian selama pendinginan lambat ke temperatur kamar mendekati kondisi ekuilibrium, sebanyak kurang



dari 1 wt.% tembaga ditahan dalam *solution*. Tembaga adalah pembentuk austenit yang kuat. Penguatan ferit dengan tembaga kurang daripada unsur paduan konvensional lainnya. Penambahan tembaga ke baja adalah terutama untuk pengerasan presipitasi.

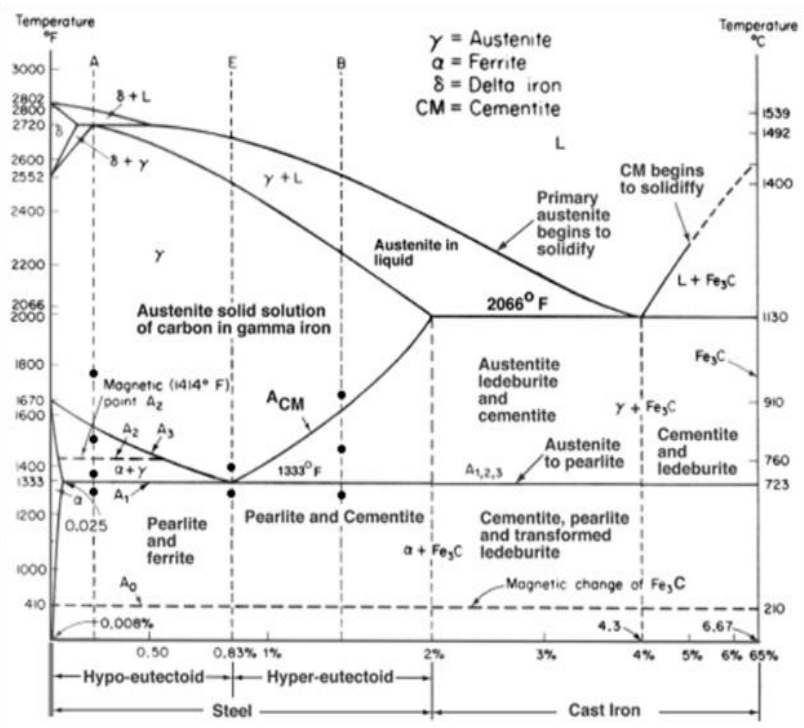
## 2.4 Baja

Baja merupakan paduan besi yang mengandung kadar karbon kurang dari 2 % dan merupakan salah satu material yang paling sering digunakan di industri. Baja karbon atau yang biasa disebut dengan *plain carbon steels* dapat diartikan sebagai baja yang hanya memiliki sedikit kandungan unsur lain selain karbon, kecuali unsur unsur yang ditambahkan untuk deoksidasi (seperti silikon dan aluminium) dan yang ditambahkan mengurangi efek dari kandungan sulfur (seperti mangan dan cerium). Karena karbon merupakan unsur paduan yang kuat dalam baja, terjadi perbedaan yang signifikan pada kekuatan, kekerasan, dan keuletan yang diperoleh dengan adanya perbedaan kecil pada komposisi karbon dalam baja. Selain itu faktor lain seperti fabrikasi, perlakuan panas, juga dapat mempengaruhi *properties* dari baja karbon tersebut (Gandy, 2007). *Plain carbon steel* bervariasi dari 0,06% karbon hingga 1,5% karbon yang dibagi menjadi tipe berikut berdasarkan dengan kadar karbon (R.S. Khurmi, 2005).

<i>Dead mild steel</i>	: mencapai 0,15% karbon
<i>Low carbon atau mild steel</i>	: 0,15% - 0,45% karbon
<i>Medium carbon steel</i>	: 0,45% - 0,8% karbon
<i>High carbon steel</i>	: 0,8% - 1,5% karbon

Diagram fasa Fe-Fe<sub>3</sub>C merupakan gambaran kondisi kesetimbangan antara komposisi besi dengan karbon, diagram ini sangat penting guna memperkirakan fasa yang terjadi sekaligus

sifat yang terbentuk oleh baja tersebut. Adapun gambar diagram fasa Fe-Fe<sub>3</sub>C adalah sebagai berikut:



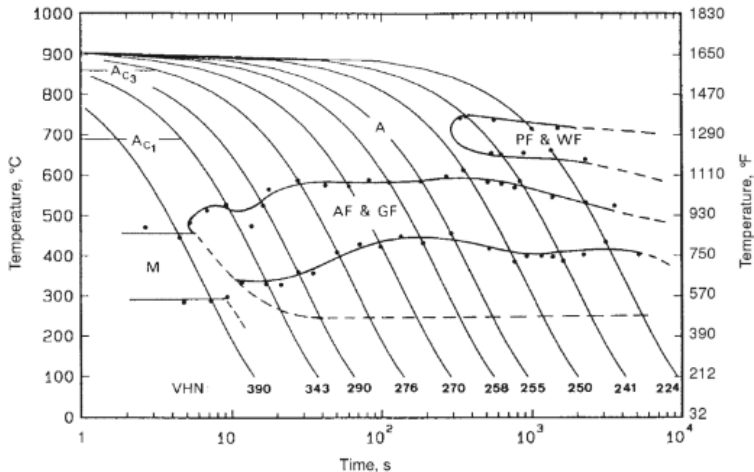
**Gambar 2. 6** Diagram fasa Fe-Fe<sub>3</sub>C (Callister, 2007)

Gambar di atas hanya menunjukkan kesetimbangan antara Fe dan C saja meskipun dalam baja sebenarnya ada unsur-unsur lain seperti Silikon, Mangan, Posfor dll. tetapi komposisinya sangat kecil dan tidak memberikan pengaruh utama terhadap diagram fasa sehingga unsur-unsur tersebut hanya dianggap sebagai pengotor. Garis  $A_0$  yaitu garis isothermal yang terdapat pada temperature  $723^{\circ}\text{C}$ , garis ini menandakan terjadinya



transformasi baja yang bersifat magnetic menjadi non magnetic pada proses pemanasan.

### 2.5.1 Struktur Mikro Ferrit pada Baja



**Gambar 2. 7** Diagram CCT untuk baja HSLA yang mengandung 0.06%C, 1.45%Mn, 1.25%Cu, 0.97%Ni, 0.72%Cr, dan 0.42%Mo.

PF, poligonal ferit; WF, Widmanstatten ferit; AF; acicular ferit; GF' granular ferit (Krauss, 2015).

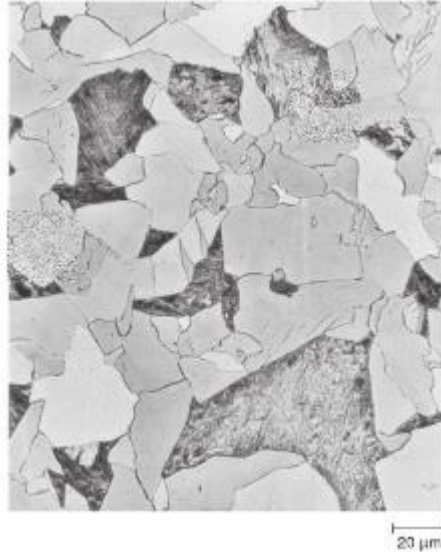
Identifikasi, karakterisasi, dan klasifikasi terhadap berbagai struktur ferit didasarkan pada diagram *Continuous Cooling Diagram* (CCT) yang ditunjukkan pada Gambar 2.7.

#### Poligonal atan *Equiaxed* Ferit

Struktur ini merupakan mikrostruktur ferit, sudah digambarkan sebagai proeutektoid ferit, terbentuk pada temperatur transformasi austenit yang sangat tinggi, dan laju pendinginan lambat pada baja karbon rendah. Butir atau kristal ferit membentuk



inti (nukleasi) sebagai batas butir *allotriomorph* dan tumbuh dari batas butir austenit untuk membentuk butir *equiaxed*.



**Gambar 2. 8** Poligonal ferit (struktur terang) dari baja HSLA-80 dengan transformasi isothermal pada 675°C. Martensit (struktur gelap) dibentuk selama pendinginan dalam austenit *untransformed* setelah ditahan isothermal. Struktur mikro, etsa nital(Krauss, 2015).

Bagian melewati butir ferit halus, refleksi terang, dan berwarna putih, dan butirferit sama-sama dipisahkan secara kontinyu, batas linear. Pertumbuhan poligonal ferit dikontrol oleh transfer substitusi atom koheren secara parsial atau keacakan *interface* austenit-ferit dan difusi jarak panjang atom karbon yang keluar dari pertumbuhan ferit(Krauss, 2015).

### Quasi Poligonal atau *Massive* Ferit



Pendinginan cepat pada baja karbon sangat rendah, dari temperatur dimana mikrostruktur fase tunggal austenit stabil ke temperatur dimana mikrostruktur fase tunggal ferit stabil, yang memungkinkan temperatur transformasi austenit ke ferit tinggi tanpa perubahan komposisi. Pendinginan harus cukup cepat untuk mencegah pemisahan karbon antara austenit dan ferit ketika baja melewati daerah dua fase ferit-austenit. Butir ferit kasar dihasilkan oleh pendinginan cepat.



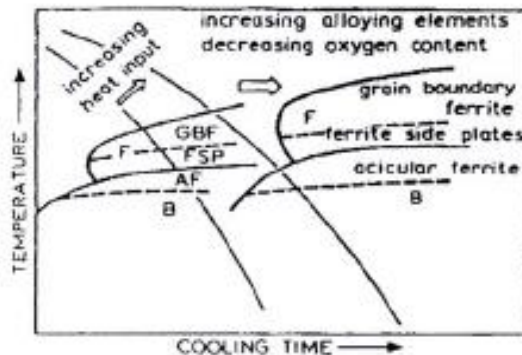
**Gambar 2. 9** Quasi poligonal ferit yang terbentuk dari baja *ultra-low carbon* yang mengandung 0.003%C dan 3.00%Mn didinginkan pada 50°C/s. Mikroskop optik. (Krauss, 2015).

Sama dengan poligonal ferit, butir *massive* adalah ferit kasar, kira-kira *equiaxed*, dan batas mereka melewati batas butir *prior-austenit*. Batas yang bergerigi pada quasi poligonal ferit,  $\alpha_q$ , mungkin disebabkan oleh beberapa atom substitusi atau interstiti yang terpisah saat migrasi interfase selama transformasi.



Keistimewaan *massive* ferit berhubungan dengan rendahnya rasio *yield strength-ultimate tensile strength* dan tingginya laju *strain-hardening*, serta menghasilkan kombinasi terbaik kekuatan dan keuletan pada baja karbon rendah pendinginan kontinyu (Krauss, 2015).

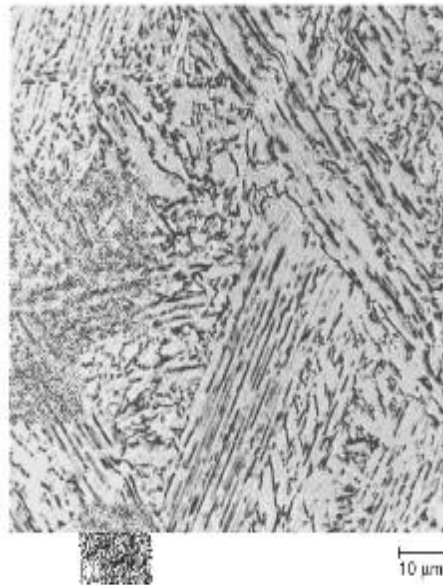
### Bainit atau Acicular Ferit



**Gambar 2. 10** Diagram CCT Baja dengan Penambahan Unsur Paduan (Suharno, 2006)

Pada tinggi laju pendinginan, transformasi austenit pada baja karbon rendah dan karbon sangat rendah menjadi kristal ferit yang lebih halus daripada morfologi ferit yang dijelaskan pada bagian sebelumnya. Kristal memiliki elongasi atau bentuk acicular dan ditunjukkan sebagai  $\alpha_a$  dalam sistem ISIJ atau sebagai acicular ferit, AF. Meskipun austenit hanya bertransformasi menjadi ferit, berdampingan dengan austenit sisa, acicular ferit, masuk dalam kelompok kristal paralel dengan austenit, juga termasuk dalam sistem klasifikasi bainit. *Range* temperatur terbentuk acicular ferit adalah secara jelas pada range temperatur *intermediate*.





**Gambar 2. 11** Acicular ferit yang terbentuk dengan transformasi isothermal yang mengandung tembaga pada baja HSLA-80 selama 5000s pada 500°C. Mikroskop optik, etsa natal (Krauss, 2015).

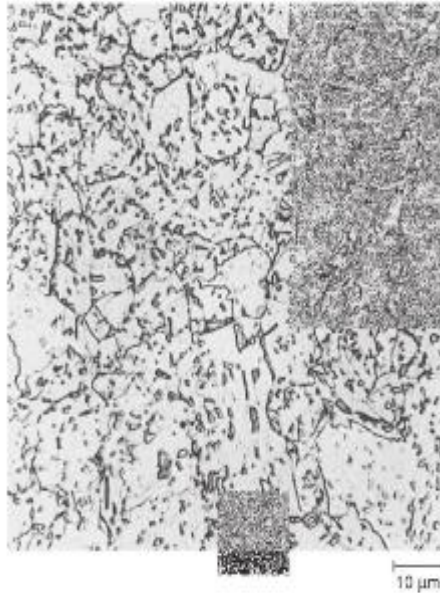
Keistimewaan yang paling menonjol yang terlihat pada mikroskop optik adalah segaris, elongasi, paralel. Struktur matriks pada Gambar 2.5 menunjukkan banyak kristal ferit yang halus, tetapi beberapa kristal memiliki orientasi kristal yang sama secara efektif dan meskipun dipisahkan oleh batas *low-angle*. Sifat mekanik pada baja karbon rendah dengan mikrostruktur acicular ferit yang besar menunjukkan rasio *yield strength-ultimate tensile strength* rendah.

### **Granular Ferit atau Granular Bainit Ferit**

Granular bainit ferit,  $\alpha_B$ , atau granular ferit, GF, terbentuk dari temperatur transformasi *intermediate* pada baja karbon



rendah. Oleh karena itu memiliki banyak kesamaan dengan bainit atau acicular ferit.



**Gambar 2. 12** Granular ferit yang terbentuk dari pendinginan kontinyu pada baja modifikasi A710 dengan komposisi 0.33% C, 1.44% Mn, 1,20% Cu, 2.19% Ni, 0.67% Cr, dan 0.46% Mo. Mikroskop optik. (Krauss, 2015).

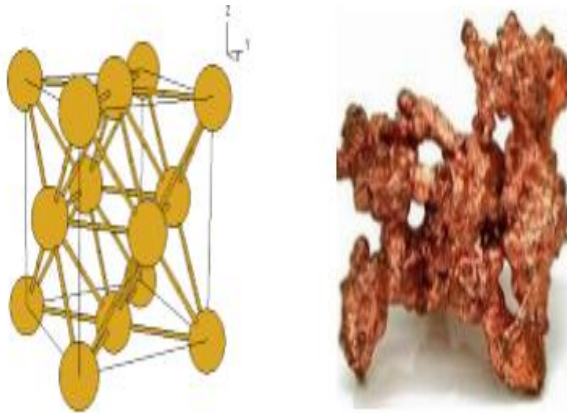
Mikrostruktur granular ferit terdiri dari austenit sisadalam matriks yang mungkin menyatakan batas butir *prior-austenit* sebagai hasil dari pengetsaan dengan nital. Bagaimanapun, berlawanan dengan acicular ferit. Partikel yang terdispersi memiliki morfologi granular atau *equiaxed*. Kristal ferit lebih halus dan berbetuk *equiaxed* (Krauss, 2015).

## 2.6 Tembaga

Tembaga adalah logam yang memiliki struktur Kristal FCC (Face Centered Cubic), Tembaga murni berwarna kemerahan.



Tembaga memiliki temperature leleh  $1083\text{ }^{\circ}\text{C}$  dan massa jenis sebesar  $8900\text{ kg.m}^{-3}$ , yang berarti bahwa tembaga tiga kali lebih berat bila dibandingkan dengan aluminium. Konduktivitas listrik dan konduktivitas tembaga lebih kecil bila dibandingkan dengan perak, tetapi lebih besar bila dibandingkan dengan aluminium.



**Gambar 2. 13** (a) Struktur Kristal Tembaga (b) Tembaga  
(Konecna, 2012)

Tembaga banyak digunakan dalam keperluan industry di dunia. Tembaga digunakan karena memiliki konduktivitas panas dan listrik yang sangat baik. Selain itu tembaga juga digunakan karena dapat menyebabkan kombinasi yang diinginkan dalam sifat kelistrikan, sifat mekanik serta ketahanan korosi melalui proses *alloying* dan perlakuan panas.



**Tabel 2. 7** Sifat tembaga pada berbagai komposisi (Konecna, 2012)

Material	UNS No.	Purity; other elements (wt%)	Yield stress $R_{p0.2}$ (MPa)	Ultimate tensile strength $R_m$ (MPa)	Fracture strain $A_f$ (%)	Thermal conductivity $\kappa$ ( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ )	Electrical resistivity $\rho$ ( $\mu\Omega \text{ cm}$ )
Pure Cu (oxygen-free electronic)	C10100	99.99 Cu	69–365	221–455	4–55	392	1.741
Pure Cu (oxygen-free)	C10200	99.95 Cu	69–365	221–455	4–55	397	1.741
Electrolytic tough pitch Cu	C11000	99.90 Cu–0.04 O	69–365	224–455	4–55	397	1.707
Oxygen-free low phosphorus Cu	C10800	99.95 Cu–0.009 P	69–345	221–379	4–50	397	2.028
Phosphorus deoxidized arsenical Cu	C14200	99.68 Cu–0.35 As–0.02 P	69–345	221–379	8–45	397	3.831

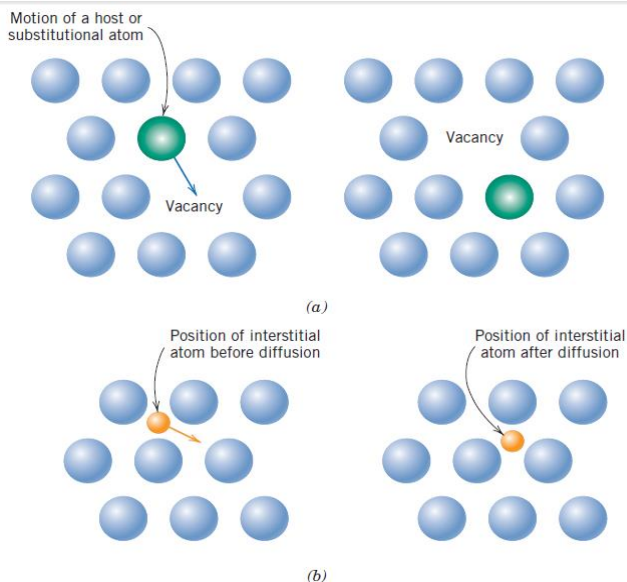
Tembaga memiliki sifat mampu bentuk dan ketangguhan yang baik pada temperatur kamar dan juga pada saat pengurangan temperature. Peningkatan temperature menurunkan kekuatan dari tembaga, dan juga pada temperature 500 °C sifat plastis tembaga menurun. Oleh karena hal tersebut, *cold forming* atau *hot forming* pada temperature 800°C dan 900 °C pada tembaga sangat sesuai. *Cold forming* meningkatkan kekuatan tembaga tetapi menurunkan keuletannya. Pada kondisi normal tembaga memiliki kekuatan sebesar 160 MPa, melalui *hot rolling* kekuatan tembaga meningkat hingga mencapai 220 MPa. Tembaga juga memiliki keuletan yang cukup baik melalui *cold deformation*, dan dapat menyamai nilai kekuatan dari baja lunak.

## 2.7 Difusi

Perlakuan panas biasa dilakukan pada berbagai material untuk memperbaiki sifatnya. Fenomena yang terjadi selama proses perlakuan panas kebanyakan melibatkan difusi atom. Banyak



reaksi dan proses yang penting dalam perlakuan material bergantung pada transfer massa dalam solid (biasanya pada level mikroskopis) atau dari *liquid*, gas, atau fasa *solid* lain. Peristiwa ini dikenal sebagai difusi, yaitu proses transfer material yang melibatkan pergerakan atom. Peristiwa difusi dapat dikatakan sebagai *diffusion-couple* yang terjadi pada dua logam berbeda yang disambungkan sehingga kedua sisinya saling bersentuhan (Callister, 2010).



**Gambar 2. 14** Skema mekanisme (a) difusi kekosongan (b) difusi interstisial (Callister, 2010)

Kekosongan dalam logam atau paduan menghasilkan ketidakstabilan yang mengakibatkan terjadinya pergerakan dari atom-atom untuk mengisi kekosongan itu dengan mekanisme



substitusi, mekanisme difusi kekosongan dalam benda padat merupakan lompatan atom-atom dari suatu posisi tertentu di dalam strukturnya menuju posisi yang berdekatan padanya di dalam strukturnya, pada proses difusi dengan mekanisme kekosongan ini berlaku :

Laju difusi berbanding langsung dengan fraksi tempat atom kosong dari kisi susunan atom tersebut, dinyatakan  $N_v$ . Jika tempat atom kosong yang terjadi berdekatan dengan atom yang terlarut, maka atom yang terlarut maupun atom pelarut dapat berpindah ke tempat atom yang kosong. Kemungkinan pertukaran atom-atom pelarut dengan tempat atom kosong atau atom terlarut dengan tempat kosong tidak sama, hal ini disebabkan koefisien difusi dari atom pelarut dan atom terlarut berbeda.

Karena umumnya harga  $N_v = 10^{-4}$  satuan pada temperatur difusi, maka kemungkinan atom lain untuk mengisi kekosongan tersebut jarang terjadi, kadang-kadang suatu atom setelah mengisi kekosongan kembali ke posisi semula pada pertukarannya yang kedua, hal ini menghambat proses difusi.

Selain itu temperatur sangat berpengaruh pada proses difusi, hal ini dikarenakan kenaikan temperatur memperbanyak terjadinya kekosongan, hubungan temperatur dengan tingkat kekosongan dapat dirumuskan dengan persamaan

$$N^oV = \exp \frac{-\Delta G}{RT}$$

Dimana :  $N^oV$  = Konsentrasi kesetimbangan kekosongan.

$\Delta G$  = Energi bebas



Kenaikan temperatur memperbanyak kekosongan yang menyebabkan meningkatnya difusi. Lamanya waktu proses sangat berpengaruh pada ketebalan lapisan yang dihasilkan, ketebalan lapisan yang terbentuk pada proses *Hot-Dip Galvanizing* sebanding dengan difusivitas seng, hubungan antara waktu proses dengan ketebalan lapisan dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut,

$$X = \sqrt{D \cdot t}$$

Dimana : X = tebal lapisan  
D = koefisien difusi  
T = waktu proses

Ketebalan lapisan oksida merupakan fungsi akar dari waktu oksida (difusi) hubungan ketebalan lapisan hasil proses difusi dengan waktu difusi tidak hanya berlaku pada peristiwa oksidasi logam saja tetapi juga dapat digunakan pada proses difusi lainnya (Astuti,2008)

Koefisien difusi ditentukan dengan mengukur aktivitas permukaan yang dihasilkan dari proses difusi dan absorpsi, perhitungan dilakukan pada temperature antara 800°C hingga 1200°C (Butrymowicz,1976)



**Tabel 2. 8** Tracer koefisien difusi Cu ke Besi murni  
(Butrymowicz,1976)

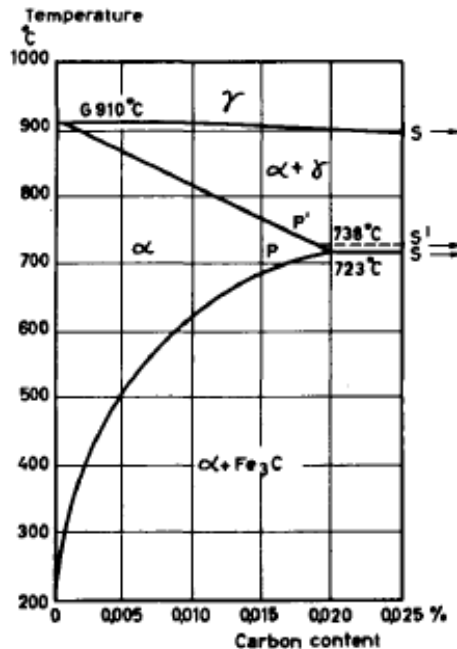
T (°C)	Phase	D* (cm <sup>2</sup> /s)
1368 <sup>a</sup>	γ	$5.20 \times 10^{-10}$
1368	γ	$5.03 \times 10^{-10}$
1315	γ	$2.56 \times 10^{-10}$
1315	γ	$2.45 \times 10^{-10}$
1285	γ	$1.55 \times 10^{-10}$
1285	γ	$1.52 \times 10^{-10}$
901.6 <sup>b</sup>	α	$5.1 \times 10^{-11}$
867.0	α	$2.2 \times 10^{-11}$
854.5	α	$1.8 \times 10^{-11}$





## 2.8 Mekanisme Penguatan pada Baja

### 2.8.1 *Precipitation Hardening*



**Gambar 2. 15** Kelarutan karbon dalam besi  $\alpha$  (Thelning, 1984)

Secara umum, dengan naiknya laju pendinginan cepat, kekuatan semakin meningkat. Saat waktu pendinginan semakin singkat, atom-atom unsur pepadu tidak sempat berdifusi ke matriks sehingga menyebabkan matriks dalam keadaan lewat jenuh (*oversaturated*). Semakin besar derajat kelewat jenuhan matriks, semakin besar pula laju pengintiannya (Easterling, 1992).



Pengerasan jenis ini secara umum terdiri dari dua perlakuan, yaitu *solution treatment* dan *aging*. Penguatan dengan metode ini dapat diaplikasikan pada baja karbon rendah agar kekerasannya meningkat. *Solution treatment* terdiri dari pemanasan baja pada temperatur sedikit di bawah A1 dimana kelarutan dari C di dalam ferit paling besar (lihat Gambar 2.15) (Thelning, 1984). Fungsi dari *solution treatment* adalah untuk memaksimalkan kelarutan unsur-unsur pepadu seperti Cu, Mg, dan Si dalam matriksnya. Larutan padat yang terbentuk selama *solution treatment* harus didinginkan dengan cepat untuk mendapatkan kondisi optimum bagi pengendapan yang dilakukan sesudahnya. Proses ini biasanya dilakukan dengan pencelupan paduan ke dalam medium air pada suhu ruangan. (Taufiq, 2010).

Setelah melakukan *solution treatment*, pengerasan paduan dapat dicapai dengan dua cara, yaitu pada saat temperatur kamar (*natural aging*) atau dengan perlakuan panas presipitasi (*artificial aging*). Penuaan pada temperatur kamar memakan waktu yang lebih lama. Apabila penuaan dilakukan secara *artificial*, maka lamanya penuaan bergantung pada temperatur pemanasan. Semakin tinggi temperturnya, semakin singkat waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kekuatan tertentu (Taufiq, 2010).

### 2.8.2 Surface Hardening

*Surface hardening* adalah sebuah proses yang menggunakan banyak variasi teknik untuk memperbaiki ketahanan aus dan kekerasan dari sebuah baja tanpa mengurangi kekuatan dan ketangguhannya. Banyak perlakuan yang digunakan pada permukaan menghasilkan residual stress yang mengurangi kemungkinan perambatan retak pada permukaan.

#### a. *Carburizing*



Proses karburisasi banyak dilakukan terhadap baja karbon rendah dengan keuletan tinggi dan kemudahannya untuk dilakukan *machining*, namun kekerasannya yang rendah tidak tahan aus menjadi masalah. Kadar karbon yang rendah membuatnya sulit untuk dikeraskan dengan metode biasa.

Karbon aktif ditambahkan dengan mendifusikannya ke kedalaman dan kadar tertentu dalam permukaan baja karbon. Ketika kadar karbon sudah cukup tinggi baru bisa dilakukan pengerasan dengan proses *quenching*. Proses penambahan karbon aktif ini dapat dibedakan berdasarkan media karburisasinya, karburisasi padat, gas dan cairan.

Ketiga proses melibatkan temperatur pemanasan baja hingga temperatur  $\pm 850-950^{\circ}\text{C}$  untuk mendifusikan karbon, Waktu yang dibutuhkan untuk difusi tiap-tiap media karburisasi biasanya beberapa jam untuk media karburisasi padat. Mekanisme difusi dari karbon ini yaitu dengan berdifusi hingga batas kelarutannya di permukaan dan berdifusi lebih lanjut ke dalam dimana kadar karbon lebih kecil, terjadi gradient konsentrasi karbon dari permukaan hingga kedalaman tertentu (Suherman, 2003).

#### b. *Nitriding*

Proses ini dilakukan dengan memanaskan baja dalam dapur beratmosfer nitrogen aktif, dimana atom-atom nitrogen berdifusi ke dalam baja dan berpadu dengan unsur paduan baja membentuk nitrida. Nitrida ini bersifat cenderung keras dan stabil. Nitrogen aktif diperoleh dari pemanasan gas ammonia yang dipanaskan pada temperatur *nitriding*  $\pm 500-600^{\circ}\text{C}$ . Proses *nitriding* sangat terbantu bila dalam baja terkandung unsur pembentuk nitrida, dimana pengaruh adanya pembentuk nitride inilah yang sangat berpengaruh dalam pengerasan pada *nitriding* (Suherman, 2003).



## 2.9 Korosi

Korosi didefinisikan sebagai kerusakan dan penurunan kualitas suatu material yang diakibatkan reaksi dengan lingkungan (Fontana, 1986) Korosi juga didefinisikan sebagai hasil perusakan dari reaksi kimia antara logam atau logam paduan dan lingkungannya. Lingkungan yang dimaksud yang dapat mengakibatkan proses korosi adalah berupa lingkungan atmosfer, gas, tanah, larutan garam, larutan asam, dll.

Korosi dapat dibagi menjadi beberapa golongan yaitu

1. Korosi kimia terjadi secara murni reaksi kimia tanpa adanya cairan elektrolit, terjadi pada temperature yang relatif tinggi dalam lingkungan udara yang kering, biasa disebut korosi oksida yang sering terjadi pada sudu turbin gas, ruang bakar, dan bagian mesin yang bekerja pada temperature tinggi.
2. Korosi elektrokimia biasanya terjadi pada lingkungan yang basah pada temperature relative rendah, dengan berbagai bentuk korosi yang berbeda mengikuti mekanisme elektrokimia yang terjadi reaksi oksidasi dan reaksi reduksi, korosi ini sering terjadi secara merata pada permukaan atau local tertentu pada daerah tertentu di daerah mesin. (Sulistijono, 1999)

Terdapat 4 komponen utama untuk terjadinya korosi elektrokimia yaitu

1. Anoda : merupakan salah satu elektoda yang berbeda pada sel elektrolit, yang memiliki potensial lebih rendah dan



lebih reaktif, mengalami reaksi oksidasi atau korosi, melepaskan electron dan mengalirkannya ke anoda, elektroda yang kehilangan electron mencari dan bergabung dengan electron bebas di elektrolit, Reaksi korosi suatu logam  $M$  dinyatakan dalam persamaan berikut (Trethewey, 1991):

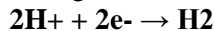


2. Katoda : merupakan salah satu dari elektroda yang berbeda pada sel elektrolit yang memiliki potensial lebih tinggi dan, mengalami reaksi reduksi. proses yang sering terjadi adalah pelepasan  $H_2$  dan reduksi  $O_2$ .

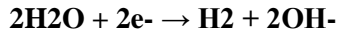
(Trethewey, 1991)

Pelepasan  $H_2$  dalam larutan asam dan netral.

Evolusi hidrogen / larutan asam:

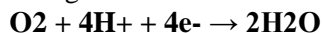


Reduksi air / larutan netral / basa:

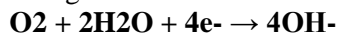


Reduksi oksigen terlarut dalam larutan asam dan netral

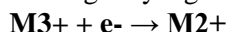
Reduksi oksigen / asam:



Reduksi oksigen / netral atau basa:



Reduksi ion logam yang lebih elektronegatif

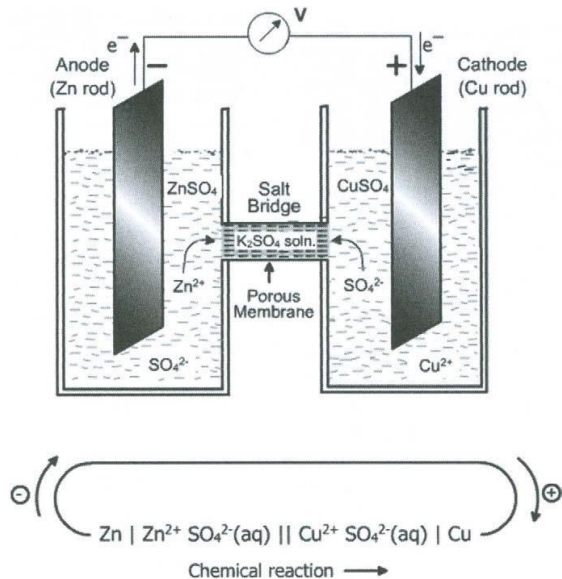


3. Elektrolit : merupakan larutan elektrik konduktif (misal garam) yang harus hadir untuk terjadi korosi, untuk menghantarkan listrik dari anoda ke katoda melalui elektrolit sebagai bentuk kation.

4. Kontak metal : dua elektroda yang terhubung eksternal oleh sebuah konduktor logam, dalam konduktor logam,



mengalirkan arus listrik dari (+) ke (-) dan mengalirkan electron dari arah yang berlawanan. (Zaki Ahmad, 2006)



**Gambar 2. 16** Skema reaksi anoda dan katoda dalam sel elektrolit. (Ahmad, 2006)

## 2.10 Passivasi Tembaga

Ketika terkena Atmospheric dalam jangka waktu yang sangat lama, tembaga membentuk pelindung permukaan yang merubah warna tembaga dan lebih dikenal dengan sebutan patina, dalam kenyataannya, lapisawarna adalah produk korosi yang bertindak sebagai lapisan pelindung terhadap korosi, ketika pertama kali terbentuk patina membentuk warna gelap yang secara bertahap berubah menjadi kehijauan, lama waktu untuk



membentuk patina tergantung pada atmosfer, jika di lingkungan laut tembaga bercampur dengan clorida dan pada lingkungan industry tembaga bercampur dengan sulfat, senyawa ini terbentuk sekitar 7 tahun, namun ketika digunakan di daerah pedesaan yang bersih, puluhan atau ratusan tahun untuk membentuk patina. (Schweitzer, 2007).

## 2.11 Penelitian Sebelumnya

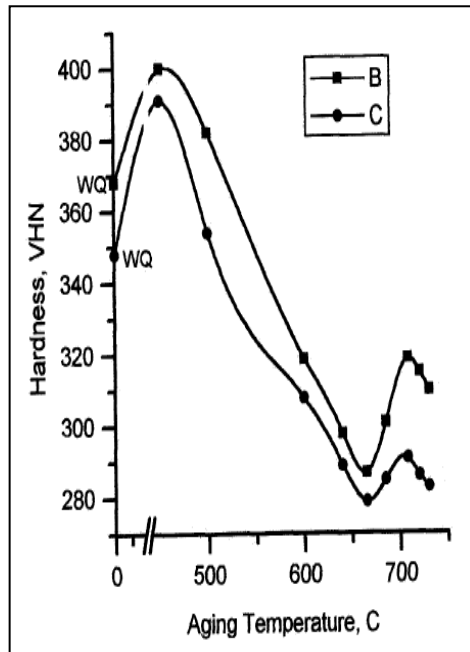
### 2.11.1 HSLA 100-Steels Influence Influence of Aging Heat Treatment on Microstructure and Properties

Penelitian ini dilakukan pada plat baja dengan komposisi seperti pada Tabel 2.4. Perlakuan panas yang dilakukan meliputi austenisasi pada temperatur 900°C selama 1 jam diikuti dengan *water quench*. Kemudian plat di-*aging* selama 1 jam pada *range* temperatur 450-730°C dan didinginkan dengan media udara.

**Tabel 2. 9** Komposisi sampel HSLA-100 (Mujahid , 2007)

Komposisi, wt%						
C	Mn	Cu	Si	Cr	Al	N
0,036	0,91	1,60	0,24	0,59	0,022	0,008

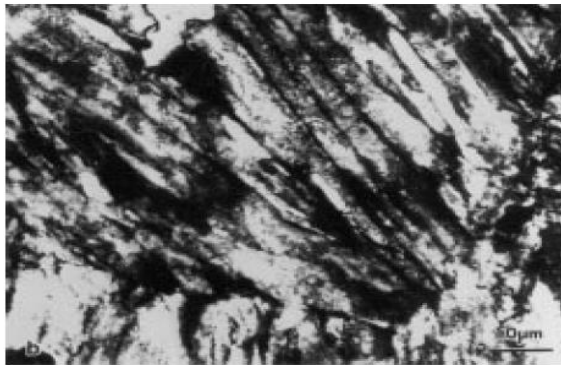
Hasil uji kekerasan pada Gambar 2.17 menunjukkan adanya perbedaan pada daerah dengan *range* temperatur berbeda. Pada *range* I (di bawah 450°C) memiliki nilai kekerasan maksimum. *Range* II (450-665°C) terjadi penurunan secara kontinyu. Di sekitar temperatur 708°C (stage III) terjadi *secondary strengthening* dan kekerasan kembali menurun pada temperatur di atas 708°C (stage IV).



**Gambar 2. 17** Variasi Temperatur *Aging* terhadap Kekerasan HSLA-100 (Mujahid. 2007).

Dari gambar struktur mikro sampel *water-quench* pada Gambar 2.18 yang diambil dengan TEM tampak adanya martensit dan sejumlah kecil austenit sisa. Austenit sisa ditemukan di antara bilah martensit. Pada *aging* dengan *range* I masih didapati adanya bilah martensit seperti pada baja *water-quench*, tetapi pada beberapa daerah didapati adanya *fine copper cluster* dan presipitan Nb(C, N) dengan bentuk *spherical*.

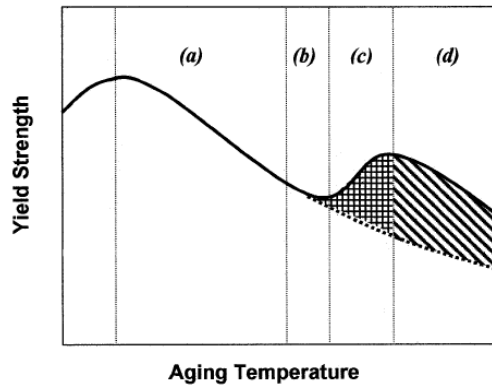




**Gambar 2. 18** Mikrograf TEM Baja *Water-Quench* (Mujahid. 2007).

Presipitat tembaga dengan bentuk *spherical* terdapat pada baja dengan *range* temperatur *aging* II. Pada *range* temperatur *aging* III sepenuhnya telah terjadi *recovery* tetapi belum keseluruhan mengalami rekristalisasi dan didapati adanya fasa austenit baru pada pemanasan mencapai 665°C. Austenit baru yang terbentuk pada *range* temperatur *aging* III bertransformasi menjadi bainit halus pada *range* temperatur *aging* IV.

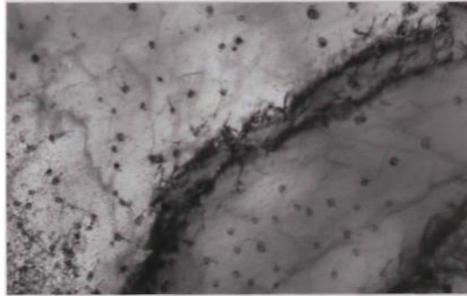
Gambar 2.19 menunjukkan perubahan temperatur *aging* terhadap kekuatan yield. Daerah (a) menunjukkan *range* temperatur terjadinya *recovery* dari matriks baja diikuti dengan pembentukan partikel presipitat Cu, daerah (b) merupakan daerah temperatur pembentukan austenit baru, (c) daerah dimana austenit baru bertransformasi menjadi martensit, dan (d) merupakan *range* temperatur terjadinya transformasi dari austenit baru menjadi bainit (Mujahid. 2007).



**Gambar 2. 19** Perilaku *aging* dari HSLA Copper-Bearing Steels (Mujahid. 2007)

### 2.11.2 Transformation Characteristic Structure-Properties Relationship of Cu Bearing HSLA Steel

Pada penelitian ini dilakukan tiga tahapan yaitu isothermal transformation, *continuous cooling transformation*, dan *aging*. Sampel di panaskan pada temperature 1200 °C selama 15 menit dan sampel yang lain di pansakan pada 900 °C selama 30 menit. Kemudian dilakukan pendinginan cepat menggunakan media air. *Aging* dilakukan untuk menganalisa pembentukan presipitasi. Dari proses yang dilakukan dalam percobaan ini terlihat presipitat Cu yang terbentuk bersama dengan quassi polygonal ferrit dan polygonal ferrit.



**Gambar 2. 20** Presipitat Cu pada Ferrit (Sadegh, 1994)

Dari penelitian tersebut menyebutkan bahwa *age hardening* dengan presipitat Cu sangat bergantung pada kondisi perlakuan awal terhadap spesimen, spesimen yang di dinginkan secara cepat cenderung membentuk martensit pada baja paduan rendah Cu sedangkan benda yang diberikan *thermomechanical treatment* cenderung membentuk *polygonal* atau *quasipolygonal ferrit*. Adanya dislokasi yang tinggi menyebabkan banyaknya ruang untuk pertumbuhan presipitasi Cu sehingga terbentuk partikel yang lebih homogeny. Selain itu peningkatan temperatur *Aging* meningkatkan kecepatan pembentukan dari presipitasi Cu. (Sadegh, 1994)

### **2.11.3 Analysis of Copper Effect on Microstructure and Mechanical Properties in Microalloyed Steel**

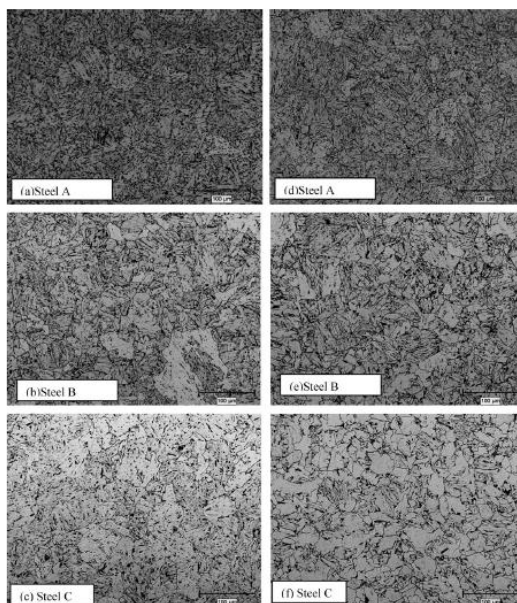
Penelitian ini dilakukan oleh Elwazri, dkk ini menganalisis tentang pengaruh dari penambahan unsur paduan Nb dan Cu pada baja dengan kadar karbon sekitar 0,03% di bawah deformasi dingin. Material yang digunakan memiliki komposisi seperti Tabel 2.10. Sampel yang dipakai dipanaskan dalam *radiant furnace* lalu didinginkan dengan laju pendinginan 1°C/s sampai ke temperatur 400°C, ditahan selama 5 menit agar sampel homogen. Kemudian sampel ditekan dengan regangan antara 0,06-0,2 pada *strain rate*



konstan dan ditahan pada tempoeratur tersebut dari 10-180 menit. Proses ini kemudian diikuti dengan pendinginan dengan media udara. Selain itu juga terdapat sampel yang dipanaskan kembali seperti proses di atas dan di-*aging* pada temperatur 400°C dengan rentang waktu 10-180 menit, diikuti dengan pendinginan dengan media udara.

**Tabel 2. 10** Komposisi sampel HSLA-100 (Elwazri.2007)

Baja	C	Mn	Si	Cu	Nb	Ti	Mo	N
A	0,038	1,8	0,28	0,42	0,09	0,02		0,0092
B	0,049	1,6	0,08	0,4	0,07	0,02	0,3	0,009
C	0,039	1,6	0,08		0,07	0,02	0,3	0,09

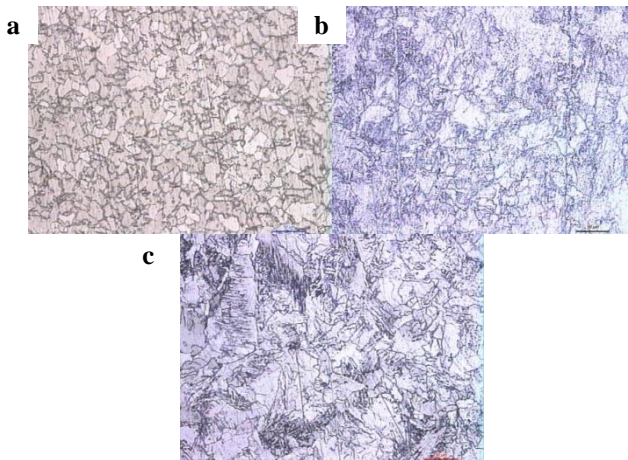


**Gambar 2. 21** Struktur Mikro Baja Hasil Aging (a,b,c) dan Deformasi Dingin(d,e,f) (Elwazri.2007)

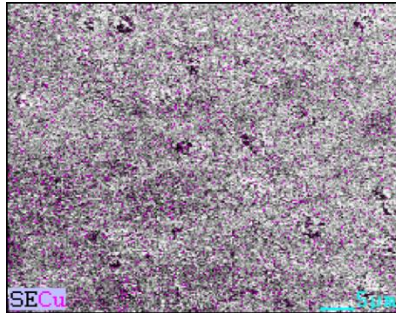


Berdasarkan hasil pengamatan dengan mikroskop optik diperoleh struktur mikro seperti pada Gambar 2.21. Pada keseluruhan baja, baik yang hanya di-*aging* maupun dideformasi dingin memiliki fasa berupa ferit yang tidak beraturan dan fasa kedua yang tersebar di antara butir ferit. Fasa kedua tersebut dapat berupa perlit dan/atau *acicular ferrite*. Dapat dilihat pula terjadi penghalusan butir pada sampel setelah dideformasi dingin dibanding sampel yang hanya di-*aging* (Elwazri. 2007).

#### 2.11.4 Pengaruh Short immersing time dan laju pendinginan terhadap *microstructure* dan perilaku tembaga pada *dead mild steel*



**Gambar 2. 22** Mikrostruktur baja AISI 1006 dengan pendinginan *quenching* menggunakan perbesaran 200x untuk spesimen(a)sebelum *copperizing*, (b)*copperizing* 5 menit, (c)*copperizing* 7 menit (Cunika, 2016)



**Gambar 2. 23** Hasil Mapping SEM/EDX Sampel *Copperizing* dengan pendinginan *quenching*(Cunika, 2016)

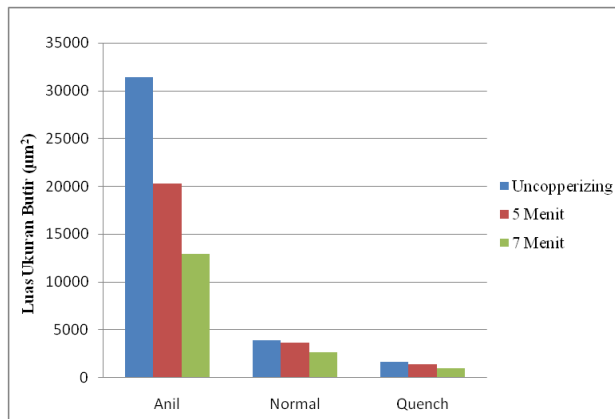
Hasil uji struktur mikro pada baja AISI 1006 sebelum dan setelah *copperizing* dengan pendinginan cepat media air (*quenching*) ditunjukkan Gambar 2.22. Pada struktur mikro spesimen kontrol baja AISI 1006 *uncopperizing* (Gambar 2.22(a)) tidak terlihat fase martensit karena kadar karbonnya yang sangat rendah yaitu sekitar 0,03% karbon. Luas ukuran butirnya adalah  $1656.808 \mu\text{m}^2$ . Pada struktur mikro baja AISI 1006 setelah dilakukan proses *copperizing* selama 5 menit pendinginan *quench* (Gambar 2.22(b)) menunjukkan bentuk butir yang runcing. Luas ukuran butirnya adalah  $1420.808 \mu\text{m}^2$ . Sedangkan struktur mikro baja AISI 1006 *copperizing* 7 menit *quench* pada Gambar 2.22(c) juga membentuk butir yang runcing seperti flake (serpihan). Untuk luas ukuran butir spesimen baja AISI 1006 *copperizing* 7 menit *quench* semakin mengecil, yakni besarnya adalah  $987.866 \mu\text{m}^2$ .

Mengecilnya ukuran butir ini menunjukkan bahwa butir ferit diperhalus dengan meningkatnya kadar tembaga. Mekanisme penghalusan butir pada struktur ferit dalam Fe-Cu paduan biner adalah karena peningkatan *driving force* pada transformasi feritik dan penurunan pertumbuhan ferit melalui penambahan tembaga setelah transformasi feritik dicapai. Selain itu laju nukleasi pada austenit meningkat dengan penambahan tembaga. Gambar 2.23 Menunjukkan Hasil Mapping Cu yang berada di sampel hasil



*copperizing*, Gambar 2.23 menunjukkan adanya persebaran Cu di dalam sampel.

Berdasarkan grafik perbandingan luas ukuran butir dengan berbagai variasi laju pendinginan yang ditunjukkan pada Gambar 6 terlihat bahwa ukuran butir spesimen baja AISI 1006 setelah *copperizing* mengecil jika dibandingkan dengan spesimen awal dengan pendinginan yang sama. Seiring dengan laju pendinginan yang semakin cepat menyebabkan ukuran butir semakin mengecil. Hal ini sesuai dengan teori pengaruh laju pendinginan baja pada umumnya yang menunjukkan semakin cepat laju pendinginan, menyebabkan ukuran butir menjadi semakin kecil/halus. (Cunika.2016)



**Gambar 2. 24** Perbandingan luas ukuran butir spesimen baja AISI 1006 setelah *copperizing* dengan berbagai variasi laju pendinginan (Cunika.2016)

### 2.11.5 Effect of Copper on the Corrosion Properties of Low-Alloy Steel in an Acid Chloride

Percobaan ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh yang diberikan oleh tembaga pada baja *low carbon steel* dalam lingkungan asam klorida, material yang di gunakan sesuai dengan



table 2.11 , pengujian ketahanan korosi diselidki dengan metode elektrokimia, seperti tes polarisasi potensio dinamik ( tafel ) dan Elektrokimia impedansi spektroskopi (EIS), kemudian analisa XPS dari permukaan berkarat .

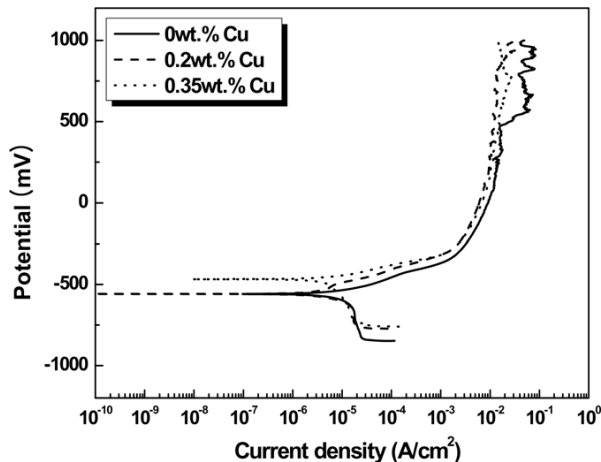
**Tabel 2. 11** Material uji (Jang, 2009)

Specimen	Composition (wt.%)						
	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cu
0 wt.% Cu	balance	0.07	0.25	0.7	0.01	0.012	-
0.2 wt.% Cu	balance	0.07	0.25	0.7	0.01	0.012	0.2
0.35 wt.% Cu	balance	0.07	0.25	0.7	0.01	0.012	0.35

Lingkungan yang di gunakan adalh lingkungan hujan asam dengan  $\text{pH} < 5.6$ , elektrolit yang digunakan dari air suling  $\text{pH} 4$  ( $6.25 \times 10^{-5} \text{ M H}_2\text{SO}_4$ ) dengan penambahan  $200 \text{ ppm Cl}^{-1}$  ( $5.5 \times 10^{-3} \text{ M NaCl}$ ), untuk pengujian potensial dynamic menggunakan scan rate  $0.166 \text{ mV/s}$  dengan  $-250 \text{ mV}$  hingga  $+1000 \text{ mV}$ , dan untuk pengujian EIS dengan frekuensi  $10 \text{ mHz}$  hingga  $100 \text{ kHz}$ . Denga AC amplitude  $20 \text{ mV}$

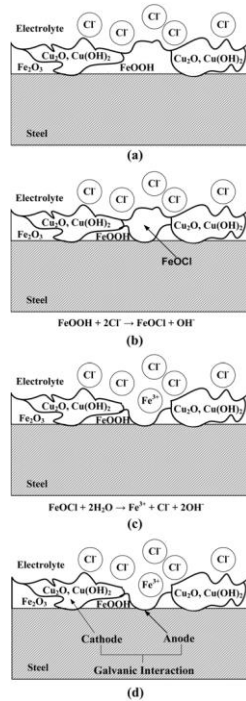
Pada percobaan polarisasi didapatkan hasil terjadi penurunan kecepatan korosi semakin bertambahnya kadar tembaga dalam *low carbon steel*





**Gambar 2. 25** Pengujian potentiodynamic polarization test (Jang, 2009)

Pada percobaan ini di dapatkan bahwa permukaan baja paduan rendah dalam lingkungan hujan asam, mengalami pembubaran selektif konstituen lebih aktif, karena akumulasi Cu di permukaan, akumulasi senyawa Cu meningkatkan korosi seragam yang terjadi, ketahanan *low carbon steel* dengan menekan pembubaran aktif, namun jika melihat morfologi permukaan berkarat peningkatan terhadap ketahanan korosi seragam memang terjadi namun memengaruhi peningkatan terhadap pitting korosi akibat bertambahnya Cu.



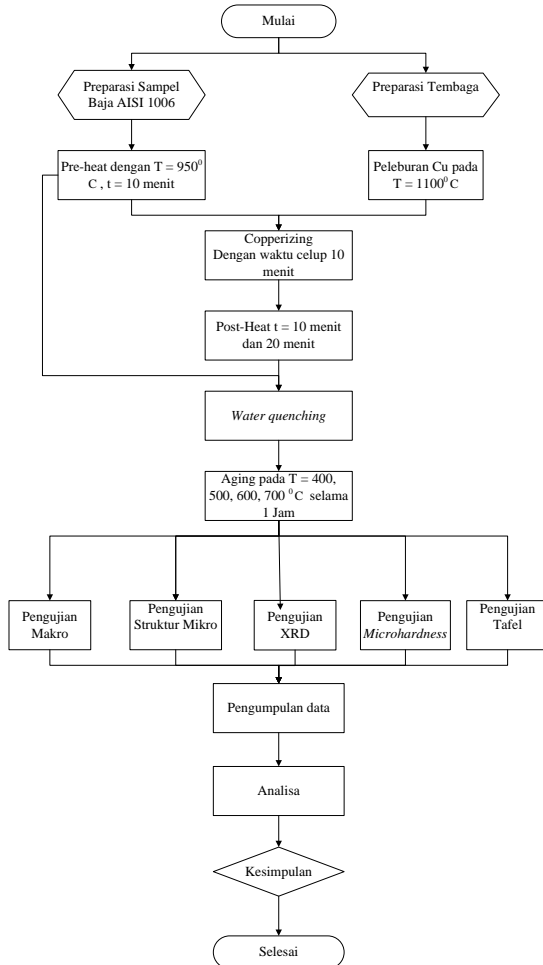
**Gambar 2. 26** Proses korosi yang terjadi di permukaan baja dengan pengaruh tembaga. (Jang, 2009)



## BAB III

### METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Diagram Alir



**Gambar 3. 1** Diagram Alir Penelitian



### 3.2 Alat dan Bahan Penelitian

#### 3.2.1. Bahan-bahan Penelitian

1. Plat Baja AISI 1006
2. Tembaga murni
3. Larutan etsa Nital ( $\text{HNO}_3$  dan methanol)
4. Resin
5. Katalis
6. *Metal polish*
7. Air
8. Larutan Buffer
9. Larutan  $\text{H}_2\text{SO}_4$  pH 4.0

#### 3.2.2. Alat-alat Penelitian

1. *Cutting tool*  
Digunakan untuk memotong tembaga murni, sampel awal (baja AISI 1006), sampel hasil *copperizing*, sampel hasil *solution treatment*, dan sampel hasil *aging*.
2. *Muffle furnace*  
Digunakan untuk memanaskan (*pre-heat*) baja AISI 1006, mencairkan tembaga, melakukan *solution treatment*, dan *aging*.
3. *Crucible* grafit  
Digunakan sebagai wadah tembaga saat dileburkan dan tempat *copperizing*.
4. Penjepit logam  
Digunakan untuk memasukkan dan mengambil sampel ke atau dari *muffle furnace*.
5. Ember  
Sebagai tempat air untuk *water quench*.
6. Pipa Sok



- Digunakan sebagai cetakan sampel uji metalografi saat *mounting*.
7. Kertas Amplas  
Digunakan untuk *grinding* saat preparasi sampel untuk uji metalografi.
  8. Mikroskop stereo  
Digunakan untuk mengamati penampang melintang secara makro dari sampel control dan seluruh specimen yang di *copperizing*.
  9. PH Meter  
Digunakan untuk mengukur pH larutan yang dibuat
  10. Gelas Ukur  
Digunakan untuk mengukur volume larutan yang dibuat
  11. Spatula  
Digunakan untuk mengaduk NaCl yang diberikan kepada larutan agar larut sempurna
  12. Alat uji kekerasan  
Digunakan untuk mengukur kekerasan baja AISI 1006 yang digunakan sebagai sampel kontrol dan sampel uji
  13. Mikroskop optik  
Digunakan untuk mengamati struktur mikro dari baja AISI 1006, sampel hasil *copperizing* dan seluruh sampel lain dalam penelitian .
  14. Alat uji XRD  
Digunakan untuk mengetahui kandidat fasa yang terbentuk pada sampel hasil.
  15. Alat uji Tafel  
Digunakan untuk mengukur laju korosi dari sampel tanpa *copperizing* dan sampel hasil *copperizing*.



### 3.3 Prosedur Penelitian

#### 3.3.1 Preparasi Sampel

Preparasi sampel meliputi pemotongan baja AISI 1006 untuk masing-masing variasi waktu tahan *post-heat* pada proses *copperizing* dan sampel kontrol. Sampel untuk *copperizing* dipotong dengan dimensi 70x3.5x3 mm dan permukaannya dibersihkan dengan kertas amplas.

#### 3.3.2 Pengujian Baja AISI 1006

Untuk mengetahui kondisi awal sampel sebelum dilakukan *copperizing* dilakukan pengujian metalografi, kekerasan, pengujian XRD, dan Tafel.

- Uji struktur mikro dilakukan dengan mikroskop optik di Laboratorium Metalurgi Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS. Tujuannya untuk mengetahui struktur mikro dari sampel baja AISI 1006 yang diberikan variasi temperatur *aging*. Etsa yang dipakai yaitu nital 2%.
- Uji kekerasan yang dipakai adalah *microvickers* dengan indenter piramida sisi empat terbalik yang memiliki sudut puncak antara dua sisi yang saling berhadapan 136°, terbuat dari intan sesuai dengan ASTM E384. Sebelum dilakukan pengujian sampel dipreparasi dengan grinding, polishing, dan etching dengan nital 2%. Tujuannya untuk mengetahui kekerasan dari sampel baja AISI 1006 yang diberikan variasi temperature *aging* pada kondisi tanpa proses *copperizing*. Pengujian dilakukan di Laboratorium Metalurgi Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS.
- Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD) dilakukan untuk mengetahui fasa yang terdapat pada sampel baja AISI



1006. Pengujian dilakukan di Laboratorium Karakterisasi Material Teknik Material dan Metalurgi ITS.

- Pengujian Tafel dilakukan untuk mengukur laju korosi dari sampel baja AISI 1006 yang diberikan variasi temperature *aging* pada kondisi tanpa proses *copperizing*. Pengujian dilakukan di Laboratorium Elektrokimia Jurusan Teknik Kimia ITS.

### 3.3.3 Peleburan Tembaga

Sebelum dilebur, tembaga terlebih dahulu dipotong-potong dengan ukuran sembarang agar dapat masuk ke *crucible* grafit. Selanjutnya bak instrumen dimasukkan ke dalam furnace dan dipanaskan sampai temperatur leleh tembaga (1065°C). Banyaknya tembaga yang dileburkan dalam sekali peleburan sekitar 1,2 kg.

### 3.3.4 Pemanasan Sampel

Selama proses peleburan tembaga berjalan, sampel baja AISI 1006 yang di-*copperizing* terlebih dahulu dipanaskan dengan *muffle furnace* pada temperatur 950°C. Sampel yang dipanaskan sebanyak 12 buah.

### 3.3.5 Proses Copperizing tanpa Post Heat

Setelah dipanaskan pada temperatur 950°C, sampel dikeluarkan satu persatu dan dicelupkan ke dalam tembaga cair dengan menggunakan penjepit logam. Pencelupan dilakukan selama 10 menit untuk masing-masing sampel. Prediksi kedalaman difusi tembaga pada baja dapat dihitung melalui persamaan berikut: (Kurniasari, 2008)

$$X = \sqrt{Dt}$$

Keterangan: X = ketebalan difusi (cm)  
D = koefisien difusi (cm<sup>2</sup>/s)  
t = waktu proses (s)





Dengan waktu celup selama sepuluh menit (600 s), maka kedalaman difusi tembaga dalam baja pada temperatur 1100°C adalah: ( $D_{Cu} (1100^\circ C) = 0.59 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ )

$$X = \sqrt{0.59 \times 10^{-6} \times 600} = 1.88 \times 10^{-2} \text{ cm} = 188 \mu\text{m}$$

### 3.3.6 Pengujian Sampel Hasil Copperizing tanpa Post Heat

Untuk mengetahui kondisi sampel setelah dilakukan *copperizing* dilakukan pengamatan makro, pengujian metalografi, kekerasan, dan XRD.

- Pengamatan makro dilakukan dengan mikroskop stereo di Laboratorium Metalurgi Teknik Material dan Metalurgi ITS. Tujuannya untuk mengetahui keberadaan lapisan tembaga pada permukaan sampel. Uji struktur mikro dilakukan dengan mikroskop optik di Laboratorium Metalurgi Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS. Tujuannya untuk mengetahui struktur mikro dari sampel setelah di-*copperizing* dan selanjutnya dilakukan perhitungan luas butir rata-rata sesuai dengan ASTM E112. Etsa yang dipakai yaitu nital.
- Uji kekerasan yang dipakai adalah *microvickers* dengan indenter piramida sisi empat terbalik yang memiliki sudut puncak antara dua sisi yang saling berhadapan 136°, terbuat dari intan sesuai dengan ASTM E384. Sebelum dilakukan pengujian sampel dipreparasi dengan grinding, polishing, dan etching dengan nital 2%. Tujuannya untuk mengetahui kekerasan dari sampel setelah di-*copperizing*. Pengujian dilakukan di Laboratorium Metalurgi Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS.



- Uji Optical Emission Spectroscopy (OES) dilakukan untuk mengetahui komposisi unsur-unsur sampel setelah proses *copperizing*. Pengujian dilakukan di Laboratorium Uji Bahan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya menggunakan alat Foundry-Master Pro.
- Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD) dilakukan untuk mengetahui fasa yang terbentuk setelah proses *copperizing*. Pengujian dilakukan di Laboratorium Karakterisasi Material Teknik Material dan Metalurgi ITS.
- Pengujian kekuatan impak menggunakan metode *Charpy*. Pengujian dilakukan sesuai dengan standar ASTM E23. Pengujian dilakukan di Jurusan Teknik Perkapalan FTK-ITS.

### 3.3.7 Proses Copperizing dengan Post Heat

Pada proses ini setelah dicelupkan selama 10 menit, baja memiliki lapisan Cu pada permukaannya sehingga specimen dipindahkan dari tembaga cair dan dipanaskan pada temperature 1100 ° C dengan tujuan untuk mendifusikan kembali tembaga yang ada dipermukaan selama 10 menit dan 20 menit.

*Copperizing* baja AISI 1006 dengan waktu celup 5 menit dan pendinginan udara menghasilkan lapisan tembaga di permukaan baja dengan ketebalan (X) 141.21 µm (Vicky, 2016). Dari hasil tersebut, dapat diperkirakan waktu tahan *post-heat* (T = 1100°C) untuk menghilangkan lapisan tembaga tersebut melalui perhitungan sebagai berikut:

$$X = \sqrt{Dt} ; \text{ maka } t = \frac{X^2}{D}$$



$$t = \frac{(141.21 \times 10^{-4})^2 \text{ cm}}{0.59 \times 10^{-6}}$$

$$t = 337.97 \text{ s} = 5.63 \text{ menit}$$

### 3.3.8 Pengujian Sampel Hasil Copperizing dengan Post Heat

Untuk mengetahui kondisi sampel setelah dilakukan *post heat* pada *copperizing* dilakukan pengamatan makro, pengujian metalografi, kekerasan, dan XRD.

- Pengamatan makro dilakukan dengan mikroskop stereo di Laboratorium Metalurgi Teknik Material dan Metalurgi ITS. Tujuannya untuk mengetahui keberadaan lapisan tembaga pada permukaan sampel.
- Pengujian struktur mikro dilakukan dengan mikroskop optik di Laboratorium Metalurgi Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS. Tujuannya untuk mengetahui struktur mikro dari sampel setelah di-*copperizing* dan diberikan *variasi* waktu *post-heat*. Etsa yang dipakai yaitu nital 2%.
- Uji kekerasan yang dipakai adalah *microvickers* dengan indenter piramida sisi empat terbalik yang memiliki sudut puncak antara dua sisi yang saling berhadapan  $136^\circ$ , terbuat dari intan sesuai dengan ASTM E384. Sebelum dilakukan pengujian sampel dipreparasi dengan grinding, polishing, dan etching dengan nital 2%. Tujuannya untuk mengetahui kekerasan dari sampel setelah di-*copperizing* dan diberikan *variasi* waktu *post-heat*. Pengujian dilakukan di Laboratorium Metalurgi Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS.



- Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD) dilakukan untuk mengetahui fasa yang terbentuk setelah proses di-*copperizing* dan diberikan *variasi* waktu *post-heat*. Pengujian dilakukan di Laboratorium Karakterisasi Material Teknik Material dan Metalurgi ITS.

### 3.3.9 Proses Aging

Sampel yang telah di-*copperizing* kemudian didinginkan secara water quench dipanaskan kembali pada temperatur yang telah ditentukan selama 60 menit. Kemudian dilakukan pendinginan dengan media udara (*normalizing*). Rancangan penelitian untuk variasi waktu pemanasan dan perlakuan waktu post heat *copperizing* dapat dilihat pada tabel 3.1.

**Tabel 3. 1** Rancangan Percobaan

Temperatur Aging	Perlakuan	Pengujian				
		Pengamatan Makro	Uji Struktur Mikro	Uji <i>Microhardness</i>	Uji XRD	Uji Tafel
400	Tanpa <i>Copperizing</i>	v	v	v	v	v
	<i>Copperizing</i>	v	v	v	v	v
	<i>Copperizing</i> PH 10 Menit	v	v	v	v	
	<i>Copperizing</i> PH 20 Menit	v	v	v	v	
500	Tanpa <i>Copperizing</i>	v	v	v	v	v
	<i>Copperizing</i>	v	v	v	v	v
	<i>Copperizing</i> PH 10 Menit	v	v	v	v	
	<i>Copperizing</i> PH 20 Menit	v	v	v	v	
600	Tanpa <i>Copperizing</i>	v	v	v	v	v
	<i>Copperizing</i>	v	v	v	v	v
	<i>Copperizing</i> PH 10 Menit	v	v	v	v	
	<i>Copperizing</i> PH 20 Menit	v	v	v	v	
700	Tanpa <i>Copperizing</i>	v	v	v	v	v
	<i>Copperizing</i>	v	v	v	v	v
	<i>Copperizing</i> PH 10 Menit	v	v	v	v	
	<i>Copperizing</i> PH 20 Menit	v	v	v	v	



### 3.3.10 Analisis

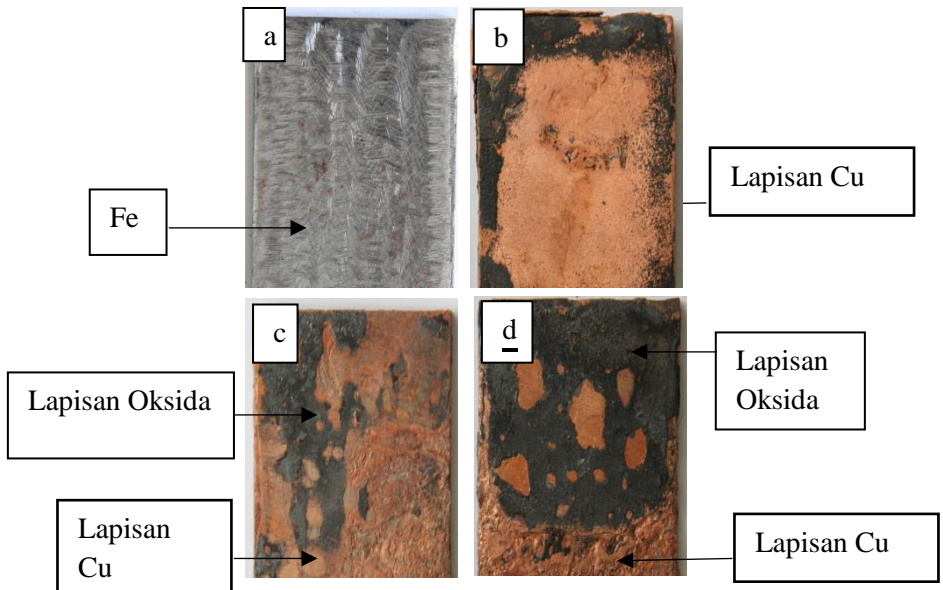
- Analisis Mikro Struktur  
Hasil uji metalografi yang berupa struktur mikro dari baja AISI 1006 tanpa perlakuan, sampel *copperizing* beserta *post heat*, dan *aging* dibandingkan untuk melihat pengaruh dari penambahan tembaga serta temperatur *solution treatment* dan *aging* terhadap struktur mikro baja AISI 1006. Dari hasil perhitungan ukuran butir rata-rata juga dapat dianalisis pengaruh dari penambahan tembaga serta temperatur *solution treatment* dan *aging* terhadap ukuran butir baja AISI 1006.
- Analisis Kekerasan  
Dari hasil uji kekerasan baja AISI 1006 tanpa perlakuan, sampel *copperizing*, dan *aging* dianalisis pengaruh penambahan tembaga serta temperatur *copperizing* beserta *post heat* dan *aging* terhadap nilai kekerasan baja AISI 1006..
- Analisis Laju Korosi  
Pengaruh dari adanya *copperizing* pada baja terhadap laju korosi sampel kemudian dianalisis melalui kurva tafel menggunakan *software* NOVA.



## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Hasil Pengamatan Makro

Pengamatan makro dilakukan untuk mengetahui perubahan kondisi spesimen pada bagian permukaan dan mikroskop stereo digunakan untuk melihat perubahan pada penampang melintang.



**Gambar 4. 1** Hasil Pengamatan Makro pada Permukaan Baja AISI 1006 a) AISI 1006 Tanpa Copperizing *Cop* 10' b) *Cop* 10' *PH* 10' c) *Cop* 10' *PH* 20'

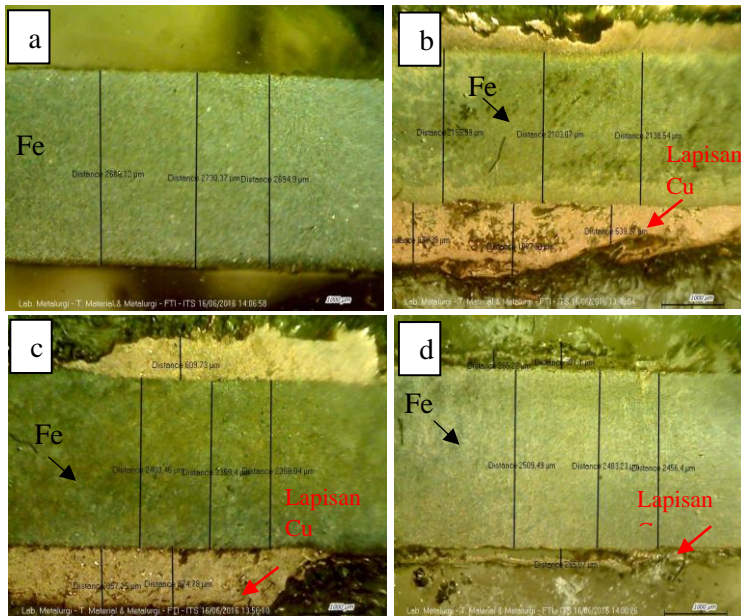


Gambar 4.1a menunjukkan kondisi awal permukaan sampel Baja AISI 1006. Gambar 4.1b merupakan hasil pengamatan makro pada sampel yang diberikan perlakuan *copperizing* selama 10 menit lalu didinginkan secara cepat dengan media air, kondisi permukaan pada gambar 4.1b menunjukkan permukaan sampel yang diberikan proses *copperizing* selama 10 menit memiliki lapisan berwarna merah yang menutupi permukaan secara merata. Gambar 4.1c menunjukkan hasil pengamatan makro pada sampel yang diberikan perlakuan *copperizing* selama 10 menit lalu diberikan *post-heat* selama 10 menit kemudian didinginkan secara cepat dengan media air. Sampel pada gambar 4.1c terlihat memiliki lapisan Cu yang berwarna lebih terang bila dibandingkan dengan sampel yang hanya diberikan proses *copperizing*, lapisan berwarna merah tersebut juga terlihat tidak merata pada permukaan sampel. Pada permukaan sampel juga terdapat lapisan berwarna hitam yang merupakan lapisan oksida yang terbentuk pada permukaan sampel yang tidak terlapsi lapisan Cu. Gambar 4.1d menunjukkan hasil pengamatan makro pada sampel yang diberikan perlakuan *copperizing* selama 10 menit lalu diberikan *post-heat* selama 20 menit kemudian didinginkan secara cepat dengan media air. Gambar 4.1d memperlihatkan bahwa pada sampel lapisan Cu berwarna merah terlihat semakin tidak merata di permukaan dan memiliki lapisan oksida yang lebih banyak bila dibandingkan dengan sampel lainnya. Hasil pengamatan makro permukaan sampel menunjukkan bahwa semua sampel yang diberikan proses *copperizing* memiliki lapisan Cu berwarna merah pada permukaan, lapisan Cu tersebut terbentuk akibat dari adanya Cu yang masih menempel pada permukaan Baja AISI 1006, yang kemudian ikut didinginkan sehingga membentuk lapisan di permukaan. Pada bagian baja yang tidak terlapsi Cu ketika didinginkan membentuk





lapisan oksida yang berwarna hitam. Hasil perbandingan pada permukaan sampel menunjukkan Lapisan Cu semakin tidak merata di permukaan sampel seiring dengan pertambahan waktu pada proses *post-heat*. Lapisan oksida yang ditemukan pada permukaan juga meningkat seiring dengan penambahan waktu *post-heat* yang diberikan pada sampel.



**Gambar 4. 2** Hasil Pengamatan Makro menggunakan mikroskop stereo dengan perbesaran 16x pada penampang melintang Baja AISI 1006 a) Tanpa Copperizing a) *Copperizing* 10' b) *Cop* 10' PH 10' c) *Cop* 10' PH 20'

Gambar 4.2a merupakan hasil pengamatan penampang melintang pada kondisi awal sampel baja AISI 1006. Pada gambar



4.2a, Sampel terlihat hanya memiliki substrat baja. Gambar 4.2b menunjukkan hasil pengamatan makro pada sampel yang diberi perlakuan *copperizing* selama 10 menit lalu didinginkan dengan media air, pada gambar terlihat adanya lapisan Cu yang tebal pada sampel yang tersebar secara merata di bagian tepi sampel, ketebalan lapisan Cu yang telah dihitung menggunakan jarak antara 2 titik pada mikroskop stereo sebesar  $795,46\mu\text{m}$ . Gambar 4.2c menunjukkan hasil pengamatan penampang melintang pada sampel yang diberi perlakuan *copperizing* selama 10 menit lalu diberikan *post-heat* selama 10 menit pada temperature  $1100^{\circ}\text{C}$ , gambar 4.2c menunjukkan lapisan Cu pada permukaan sampel tersebar secara tidak merata pada bagian tepi sampel, dengan rata-rata ketebalan yang terukur pada mikroskop ketebalan yang teukur dengan mikroskop sebesar  $646,58\mu\text{m}$ . Gambar 4.2d menunjukkan hasil pengamatan penampang melintang pada sampel yang diberi perlakuan *copperizing* selama 20 menit lalu diberikan *post-heat* selama 20 menit pada temperature  $1100^{\circ}\text{C}$  lalu didinginkan secara cepat pada media air. Gambar 4.2d memperlihatkan bahwa lapisan Cu yang berada di tepi sampel terlihat sedikit bila dibandingkan dengan sampel lain bila diukur dengan mikroskop memiliki rata-rata yaitu sebesar  $300,33\mu\text{m}$ . Hasil pengamatan melintang pada seluruh sampel menunjukkan bahwa seluruh sampel yang diberikan proses *copperizing* memiliki lapisan Cu pada bagian tepi, hal tersebut sesuai dengan pengamatan permukaan sampel. Lapisan Cu pada bagian tepi sampel semakin berkurang seiring dengan penambahan waktu *post-heat* yang diberikan pada sampel.

#### 4.2 Hasil Pengujian X-Ray Diffraction

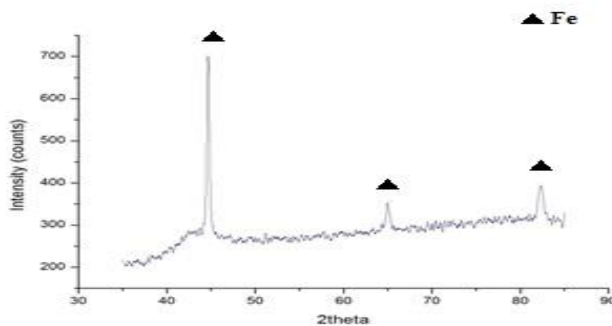
Pengujian XRD dilakukan pada Baja AISI 1006 tanpa perlakuan, seluruh sample yang di-*copperizing*, dan produk korosi pada sampel. Pengukuran difraksi sinar X dilakukan pada sudut 10-



100°. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui senyawa ataupun fasa yang terkandung pada sampel dengan melihat *peak-peak* pada hasil pengujian.

#### 4.2.1 Pengujian XRD Baja AISI 1006

Gambar 4.3 menunjukkan grafik hasil XRD baja AISI 1006. Hasil pengujian pada gambar 4.3 menunjukkan adanya *peak* tertinggi pada  $2\theta = 44,6563^\circ$ , dari hasil analisa dengan kartu PDF 87-0721 *peak* tersebut merupakan *peak* dari Fe- $\alpha$  dengan bentuk kristal BCC (1:1:0). Selain *peak* tertinggi juga muncul dua buah *peak* lain pada  $2\theta = 64,9553^\circ$  serta pada  $2\theta = 82,3476^\circ$  dari hasil analisa menggunakan PDF Card kedua *peak* yang muncul ini juga merupakan *peak* milik Fe- $\alpha$ . Hal tersebut sesuai dengan diagram fasa Fe-Fe<sub>3</sub>C, baja dengan kadar karbon 0,06% memang memiliki fasa yang berupa Fe- $\alpha$  serta struktur kristal BCC pada temperatur kamar.

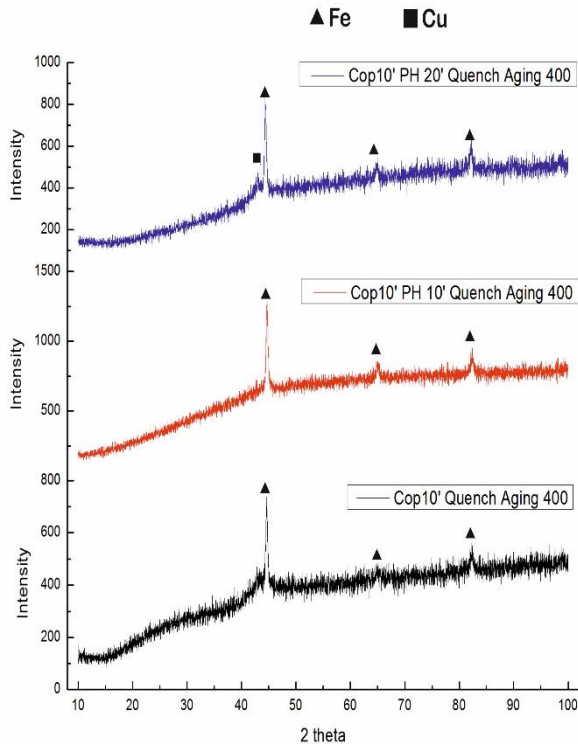


**Gambar 4. 3** Grafik Hasil XRD Baja AISI 1006

#### 4.2.2 Hasil Pengujian XRD Sampel Copperizing Variasi Waktu *Post-Heat* yang di-Aging pada Temperatur 400



Hasil Pengujian XRD pada sampel baja yang diberikan perlakuan *copperizing* dengan variasi waktu *post-heat* dan didinginkan secara cepat menggunakan media air lalu di-*aging* selama 1 jam ditunjukkan pada gambar 4.4. Gambar 4.4 menunjukkan bahwa sampel seluruh sampel memiliki peak tertinggi pada  $2\theta$  disekitar  $44,57^\circ$  dari hasil analisa setelah dicocokkan dengan *PDF-Card* 01-087-722 menunjukkan pada *peak* tersebut merupakan peak dari Fe- $\alpha$  (1:1:0) dengan struktur kristal BCC. Selain itu pada pengujian juga muncul peak pada  $2\theta$  disekitar  $64,99^\circ$  dan  $82,42^\circ$  yang juga merupakan *peak* dari Fe- $\alpha$  (1:1:0) dengan struktur kristal BCC sesuai dengan *PDF-Card* 01-087-722. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pada seluruh sampel memiliki fasa dominan berupa Fe- $\alpha$ , bila dilihat pada diagram fasa Fe-Cu menunjukkan bahwa pada kadar Fe 0.06% fasa dominan dari paduan adalah berupa Fe- $\alpha$  dengan struktur kristal BCC. Selain itu pada sampel yang diberikan perlakuan *copperizing* lalu diberikan *post-heat* selama 20 menit ditemukan *peak* Cu (1:1:1) yang memiliki bentuk kristal FCC pada  $2\theta = 42,92^\circ$  yang sesuai dengan *PDF-Card* 01-070-3038. *Peak* Cu tersebut diduga muncul akibat Cu yang berada pada lapisan yang masih menempel di permukaan. Pada sampel lain tidak muncul *peak* Cu diduga karena sampel yang dipreparasi untuk pengujian tidak memiliki lapisan tembaga seperti sampel yang memiliki *peak* Cu.



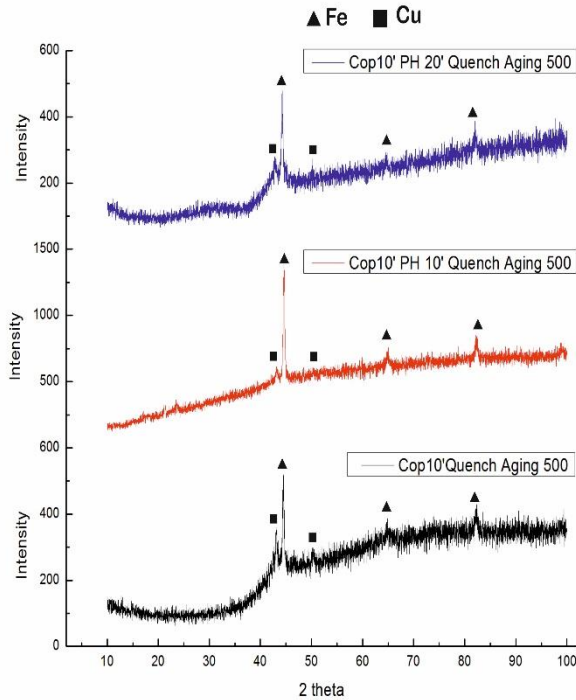
**Gambar 4. 4** Grafik Hasil XRD Sampel Copperizing Variasi Waktu *Post-Heat* yang di-Aging pada Temperatur 400<sup>0</sup> C

#### 4.2.3 Hasil Pengujian XRD Sampel Copperizing Variasi Waktu *Post-Heat* yang di-Aging pada Temperatur 500<sup>0</sup> C

Hasil Pengujian XRD pada sampel baja yang diberikan perlakuan *copperizing* dengan variasi waktu *post-heat* dan



didinginkan secara cepat menggunakan media air lalu di-aging selama 1 jam pada temperatur  $500^{\circ}\text{C}$  ditunjukkan pada gambar 4.5. Gambar 4.5 menunjukkan bahwa sampel seluruh sampel memiliki peak tertinggi pada  $2\theta$  disekitar  $44,52^{\circ}$  dari hasil analisa setelah dicocokkan dengan *PDF-Card* 01-087-722 menunjukkan pada *peak* tersebut merupakan *peak* dari Fe- $\alpha$  (1:1:0) dengan struktur kristal BCC. Selain itu pada pengujian juga muncul *peak* pada  $2\theta$  disekitar  $64,82^{\circ}$  dan  $82,56^{\circ}$  yang juga merupakan *peak* dari Fe- $\alpha$  (1:1:0) dengan struktur kristal BCC sesuai dengan *PDF-Card* 01-087-722. Selain *peak* milik Fe- $\alpha$ , Gambar hasil pengujian pada sampel juga menunjukkan adanya *peak* pada  $2\theta$  di sekitar  $43,12^{\circ}$  yang setelah dianalisa menggunakan *PDF-Card* 01-070-3038 menunjukkan bahwa *peak* tersebut merupakan *peak* milik Cu (1:1:1) dengan struktur kristal FCC. *Peak* milik Cu juga muncul pada  $2\theta$  disekitar  $50,19^{\circ}$  yang memiliki struktur kristal FCC. Hasil Pengujian pada seluruh sampel mengindikasikan bahwa fasa yang dominan pada seluruh sampel yang di-aging pada temperatur  $500^{\circ}\text{C}$  adalah fasa Fe- $\alpha$  dengan adanya juga fasa Cu yang berdiri sendiri berstruktur kristal FCC. Adanya *peak* Cu pada Gambar 4.5 tersebut diduga muncul karena adanya lapisan di permukaan dari sampel, sehingga *peak* tersebut terdeteksi. Lapisan Cu tersebut seperti yang terlihat pada permukaan sampel yang terlihat di gambar 4.2.



**Gambar 4. 5** Grafik Hasil XRD Sampel Copperizing Variasi Waktu *Post-Heat* yang di-Aging pada Temperatur  $500^\circ\text{C}$

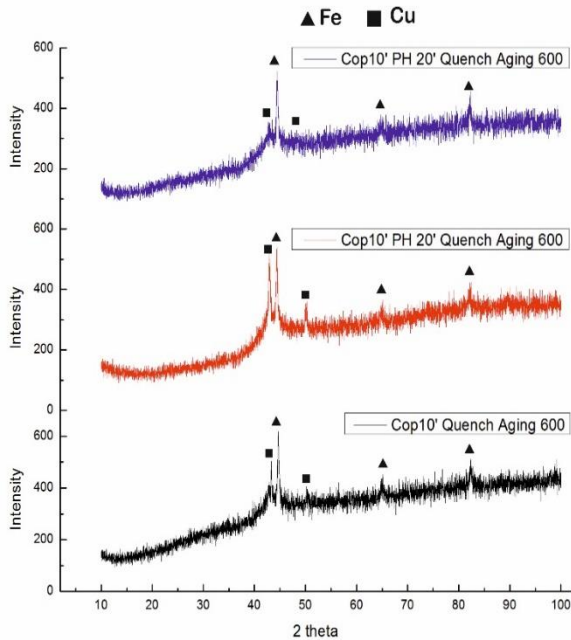
#### **4.2.3 Hasil Pengujian XRD Sampel Copperizing Variasi Waktu *Post-Heat* yang di-Aging pada Temperatur $600^\circ\text{C}$**

Hasil Pengujian XRD pada sampel baja yang diberikan perlakuan *copperizing* dengan variasi waktu *post-heat* dan didinginkan secara cepat menggunakan media air lalu di-aging



selama 1 jam pada temperatur  $600^{\circ}\text{C}$  ditunjukkan pada gambar 4.6. Gambar 4.6 menunjukkan bahwa sampel seluruh sampel memiliki *peak* tertinggi pada  $2\theta$  disekitar  $44,64^{\circ}$  dari hasil analisa setelah dicocokkan dengan *PDF-Card* 01-087-722 menunjukkan pada *peak* tersebut merupakan *peak* dari Fe- $\alpha$  (1:1:0) dengan struktur kristal BCC. Selain itu pada pengujian juga muncul *peak* pada  $2\theta$  disekitar  $64,96^{\circ}$  dan  $82,29^{\circ}$  yang juga merupakan *peak* dari Fe- $\alpha$  (1:1:0) dengan struktur kristal BCC sesuai dengan *PDF-Card* 01-087-722. Selain *peak* milik Fe- $\alpha$ , Gambar hasil pengujian pada sampel juga menunjukkan adanya *peak* pada  $2\theta$  di sekitar  $43,30^{\circ}$  yang setelah dianalisa menggunakan *PDF-Card* 01-070-3038 menunjukkan bahwa *peak* tersebut merupakan *peak* milik Cu (1:1:1) dengan struktur kristal FCC. *Peak* milik Cu juga muncul pada  $2\theta$  disekitar  $50,19^{\circ}$  yang memiliki struktur kristal FCC. Hasil Pengujian pada seluruh sampel mengindikasikan bahwa fasa yang dominan pada seluruh sampel yang di-*aging* pada temperatur  $600^{\circ}\text{C}$  adalah fasa Fe- $\alpha$  dengan adanya juga fasa Cu yang berdiri sendiri berstruktur kristal FCC. Sama halnya dengan perlakuan sebelumnya, pada seluruh sampel diindikasikan memiliki fasa Cu yang berasal dari lapisan yang terdapat dipermukaan pada saat dilakukan pengujian.





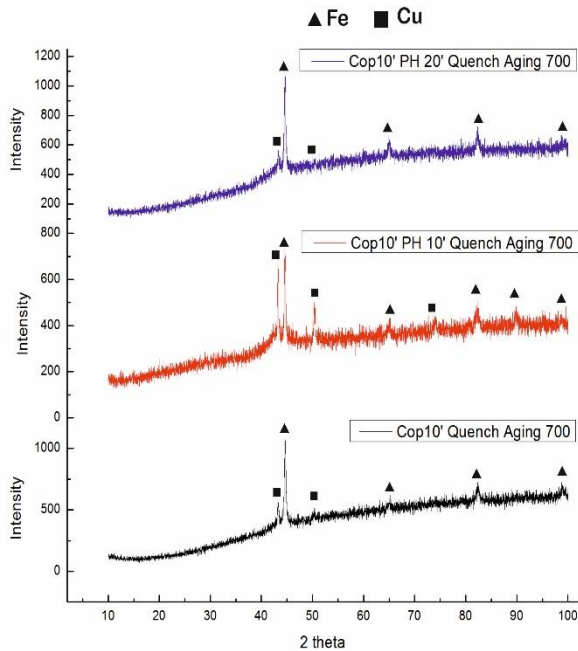
**Gambar 4. 6** Grafik Hasil XRD Sampel Copperizing Variasi Waktu *Post-Heat* yang di-Aging pada Temperatur 600<sup>0</sup> C

#### 4.2.3 Hasil Pengujian XRD Sampel Copperizing Variasi Waktu *Post-Heat* yang di-Aging pada Temperatur 700<sup>0</sup> C

Hasil Pengujian XRD pada sampel baja yang diberikan perlakuan *copperizing* dengan variasi waktu *post-heat* dan didinginkan secara cepat menggunakan media air lalu di-aging selama 1 jam pada temperatur 700<sup>0</sup> C ditunjukkan pada gambar 4.7. Gambar 4.7 menunjukkan bahwa seluruh sampel memiliki peak



tertinggi pada  $2\theta$  disekitar  $44,52^\circ$  dari hasil analisa setelah dicocokkan dengan *PDF-Card* 01-087-722 menunjukkan pada *peak* tersebut merupakan *peak* dari Fe- $\alpha$  (1:1:0) dengan struktur kristal BCC. Selain itu pada pengujian juga muncul *peak* pada  $2\theta$  disekitar  $64,82^\circ$ ,  $82,56^\circ$  dan  $98,69^\circ$  yang juga merupakan *peak* dari Fe- $\alpha$  (1:1:0) dengan struktur kristal BCC sesuai dengan *PDF-Card* 01-087-722. Selain *peak* milik Fe- $\alpha$ , Gambar hasil pengujian pada sampel juga menunjukkan adanya *peak* pada  $2\theta$  di sekitar  $43,12^\circ$  yang setelah dianalisa menggunakan *PDF-Card* 01-070-3038 menunjukkan bahwa *peak* tersebut merupakan *peak* milik Cu (1:1:1) dengan struktur kristal FCC. *Peak* milik Cu juga muncul pada  $2\theta$  disekitar  $50,19^\circ$  yang memiliki struktur kristal FCC. Hasil Pengujian pada seluruh sampel mengindikasikan bahwa fasa yang dominan pada seluruh sampel yang di-*aging* pada temperatur  $700^\circ\text{C}$  adalah fasa Fe- $\alpha$  dengan adanya juga fasa Cu berstruktur kristal FCC. Seluruh sampel yang di-*aging* pada temperature  $700^\circ\text{C}$  ini, juga menunjukkan kondisi yang sama dengan sampel sampel yang di-*aging* pada temperature  $500^\circ\text{C}$  dan  $600^\circ\text{C}$ , Cu tersebut merupakan *peak* Cu yang terbaca oleh Alat XRD pada lapisan di permukaan sampel. Lapisan Cu tersebut merupakan hasil dari Cu yang menempel pada saat pendinginan sehingga melapisi permukaan dari sampel.



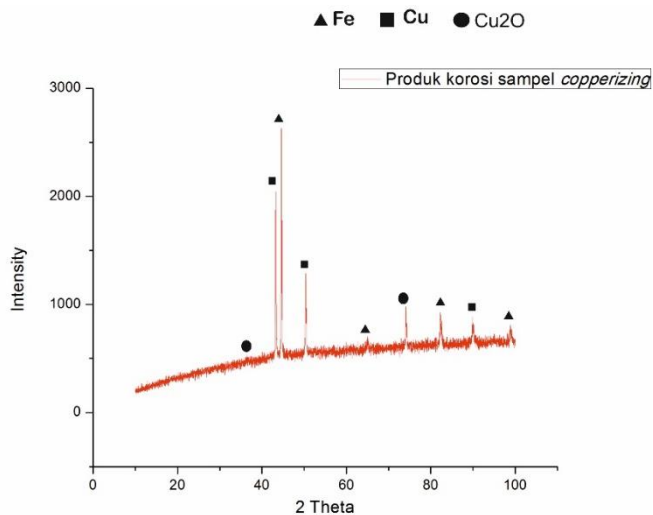
**Gambar 4. 7** Grafik Hasil XRD Sampel Copperizing Variasi Waktu *Post-Heat* yang di-Aging pada Temperatur 700<sup>0</sup> C

#### 4.2.5 Hasil Pengujian XRD Produk Korosi pada Sampel

Hasil Pengujian XRD pada produk korosi sampel hasil *copperizing* dapat dilihat pada gambar 4.7. Peak tertinggi sampel berada pada  $2\theta$  disekitar 44,74° dari hasil analisa setelah dicocokkan dengan *PDF-Card* 01-087-722 menunjukan pada *peak* tersebut



merupakan *peak* dari Fe- $\alpha$  (1:1:0) dengan struktur kristal BCC. Selain itu pada pengujian juga muncul *peak* pada  $2\theta$  disekitar  $65,05^\circ$ ,  $82,56^\circ$  dan  $98,79^\circ$  yang juga merupakan *peak* dari Fe- $\alpha$  (1:1:0) dengan struktur kristal BCC sesuai dengan *PDF-Card* 01-087-722. Selain *peak* milik Fe- $\alpha$ , Gambar hasil pengujian pada sampel juga menunjukkan adanya *peak* pada  $2\theta$  di sekitar  $43,38^\circ$ ,  $50,38^\circ$  dan  $89,97^\circ$  yang setelah dianalisa menggunakan *PDF-Card* 01-070-3038 menunjukkan bahwa *peak* tersebut merupakan *peak* milik Cu (1:1:1) dengan struktur kristal FCC. *Peak* lain pada  $2\theta = 37,11^\circ$ ,  $74,31^\circ$  dan  $89,87^\circ$  muncul dan dianalisa menggunakan kartu pdf 1-078-2076 merupakan *peak* milik  $\text{Cu}_2\text{O}$ .



**Gambar 4. 8** Grafik Hasil XRD Produk Korosi Pada Sampel Copperizing



---

### 4.3 Analisa Hasil Pengujian Struktur Mikro

Pengujian metalografi dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi temperature *aging* serta waktu *post-heat* setelah proses *copperizing* terhadap struktur mikro baja AISI 1006. Pengamatan Struktur mikro dilakukan dengan mengkorosikan batas butir baja menggunakan etsa nital 2%.

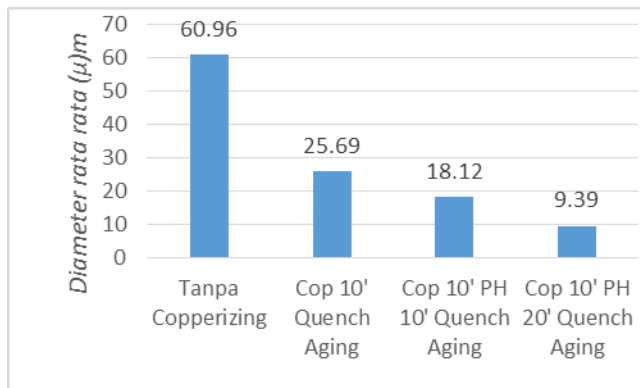
#### 4.3.1 Analisa Hasil Pengamatan Struktur Mikro Sampel Copperizing Variasi Waktu Post-Heat yang di-Aging pada Temperatur 400<sup>0</sup> C

Hasil Pengujian metalografi pada Baja AISI 1006 dengan variasi waktu *post-heat* yang di dinginginkan secara cepat kemudian di-aging pada temperature 400<sup>0</sup> C terlihat pada gambar 4.10. Gambar 4.10a menunjukkan sampel tanpa copperizing yang didinginkan secara cepat dengan media air kemudian di aging pada temperature 400<sup>0</sup> C. Hasil pengamatan pada gambar menunjukkan bahwa struktur yang terbentuk pada sampel dengan perlakuan tersebut adalah struktur berbentuk *polygonal ferrit*, struktur polygonal pada ferrit yang terbentuk terjadi akibat pertumbuhan yang sempurna dari ferrit yang muncul di batas butir austenite sehingga dapat memiliki bentuk polygonal yang sempurna (Wilson,1994). Gambar 4.10b menunjukkan hasil metalografi sampel yang mengalami proses *copperizing* lalu didinginkan secara *quenching*, kemudian diaging pada temperatur 400<sup>0</sup> C. Terlihat adanya perbedaan struktur akibat adanya proses *copperizing* dimana struktur yang terbentuk adalah *quasi-polygonal ferrite* dan *acicular ferrite* pada sampel. Gambar 4.10c menunjukkan hasil metalografi sampel yang mengalami proses

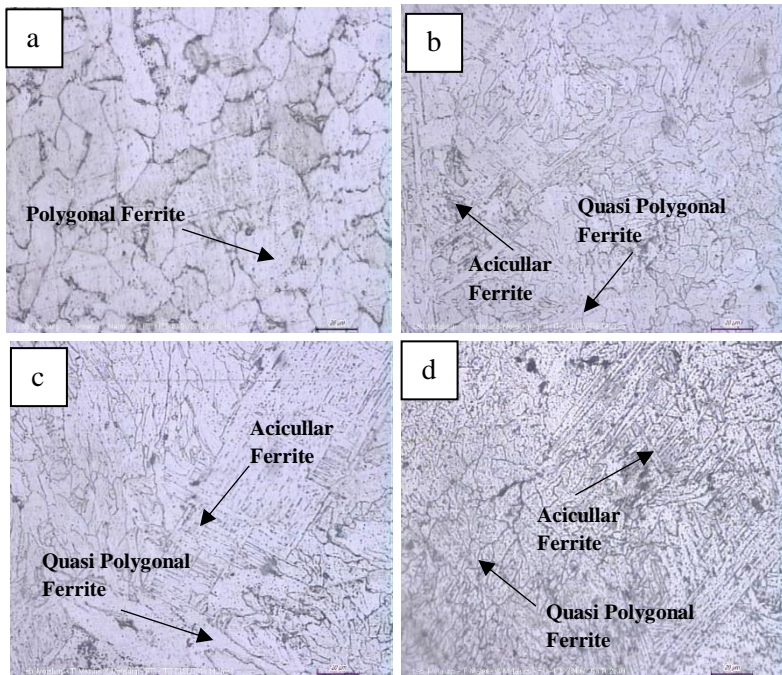


*copperizing* selama 10 menit dan di *post-heat* selama 10 menit ,lalu didinginkan secara *quenching*, kemudian diaging pada temperatur 400<sup>0</sup> C selama 1 jam. Gambar 4.10c juga menunjukkan adanya struktur *quasi-polygonal ferrite* dan *acicular ferrit*, Gambar 4.9d menunjukkan hasil metalografi sampel yang mengalami proses *copperizing* selama 10 menit dan di *post-heat* selama 20 menit ,lalu didinginkan secara *quenching*, kemudian diaging pada temperatur 400<sup>0</sup> C selama 1 jam, sama halnya dengan sampel lain yang mengalami proses *copperizing* struktur yang terbentuk pada gambar 4.10d *quasi-polygonal ferrite* dan *acicular ferrit*. Adanya perbedaan struktur mikro antara sampel *copperizing* dengan tanpa *copperizing* menunjukkan adanya pengaruh unsur paduan dimana dengan pendinginan yang sama dapat membentuk struktur *acicular* dan *quasi-polygonal* ferrit. Semakin lama waktu tahan *post-heat* menunjukkan semakin banyak *acicular ferrit* yang terbentuk pada baja, hal tersebut dikarenakan lamanya waktu penahanan pada temperatur *post-heat* yang menyebabkan pertumbuhan butir austenite yang semakin besar, semakin kasar butir austenite menyebabkan semakin banyak *acicular ferrit*. (Weng.2008).

Ukuran butir sampel siukur menggunakan metode *Heyn Lineal Intercept* untuk melihat pertumbuhan butir yang terjadi pada sampel. Hasil pengukuran diameter rata rata ukuran butir dapat dilihat pada gambar 4.9 . Dari gambar terlihat bahwa sampel tanpa *copperizing* memiliki ukuran butir yang paling besar bila dibanding sampel lain. Penambahan waktu *post-heat* terlihat menurunkan diameter rata-rata ukuran butir pada sampel



**Gambar 4. 9** Grafik diameter ukuran Butir rata rata sampel yang di Aging pada Temperatur 400 °C



**Gambar 4. 10** Hasil Pengujian Struktur Mikro pada Sampel Variasi Waktu *Post-Heat* yang di- *Aging* selama 1 jam pada Temperatur 500°C a) Tanpa *Copperizing* b) *Copperizing* 10' b) *Cop* 10'PH 10' c) *Cop* 10' PH 20'

#### 4.3.2 Analisa Hasil Pengamatan Struktur Mikro Sampel *Copperizing* Variasi Waktu *Post-Heat* yang di-*Aging* pada Temperatur 500°C

Hasil Pengujian metalografi pada Baja AISI 1006 dengan variasi waktu *post-heat* yang di dinginginkan secara cepat kemudian di-*aging* pada temperature 500°C terlihat pada gambar 4.12. Gambar 4.12a menunjukkan sampel tanpa *copperizing* yang



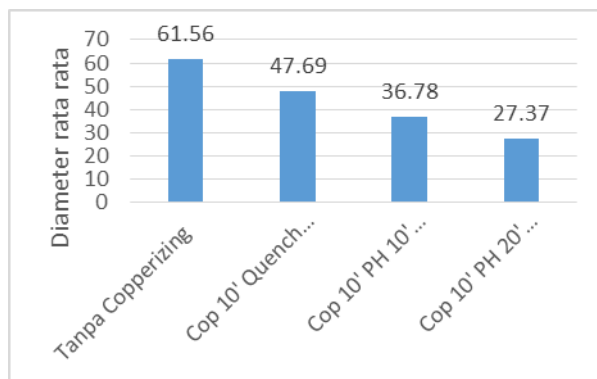


didinginkan secara cepat dengan media air kemudian di aging pada temperature  $500^{\circ}\text{C}$ . Hasil pengamatan pada gambar menunjukkan bahwa struktur yang terbentuk pada sampel dengan perlakuan tersebut adalah struktur berbentuk *polygonal ferrit*. Gambar 4.12b menunjukkan hasil metalografi sampel yang mengalami proses *copperizing* lalu didinginkan secara *quenching*, kemudian diaging pada temperatur  $500^{\circ}\text{C}$ . Pada gambar terlihat adanya perbedaan struktur akibat adanya proses *copperizing* dimana struktur yang terbentuk adalah *quasi-polygonal ferrite* dan *acicular ferrite* pada sampel. Gambar 4.12c menunjukkan hasil metalografi sampel yang mengalami proses *copperizing* selama 10 menit dan di *post-heat* selama 10 menit ,lalu didinginkan secara *quenching*, kemudian diaging pada temperatur  $500^{\circ}\text{C}$  selama 1 jam. Gambar 4.12c juga menunjukkan adanya struktur *quasi-polygonal ferrite* dan *acicular ferrit*, Gambar 4.10d menunjukkan hasil metalografi sampel yang mengalami proses *copperizing* selama 10 menit dan di *post-heat* selama 20 menit ,lalu didinginkan secara *quenching*, kemudian diaging pada temperatur  $500^{\circ}\text{C}$  selama 1 jam, sama halnya dengan sampel lain yang mengalami proses *copperizing* struktur yang terbentuk pada gambar 4.12d berupa struktur *quasi-polygonal ferrite* dan *acicular ferrit*. Dari hasil pengamatan struktur mikro memperlihatkan adanya perbedaan struktur yang diakibatkan oleh penambahan Cu serta pemanasan *post-heat*, dimana dengan adanya penambahan Cu membuat struktur yang tadinya berupa *polygonal ferrite* menjadi *quasi-polygonal* dan *acicular ferrit*. Sama halnya dengan sampel pada temperature Aging  $400^{\circ}\text{C}$  sampel hasil *copperizing* memiliki strukur mikro yang berbeda dengan sampel tanpa *copperizing*. Struktur acicular ferrite terlihat lebih sedikit dibandingkan dengan struktur mikro pada sampel dengan temperature *aging*  $400^{\circ}\text{C}$ . Semakin lama waktu *pos-heat* membuat

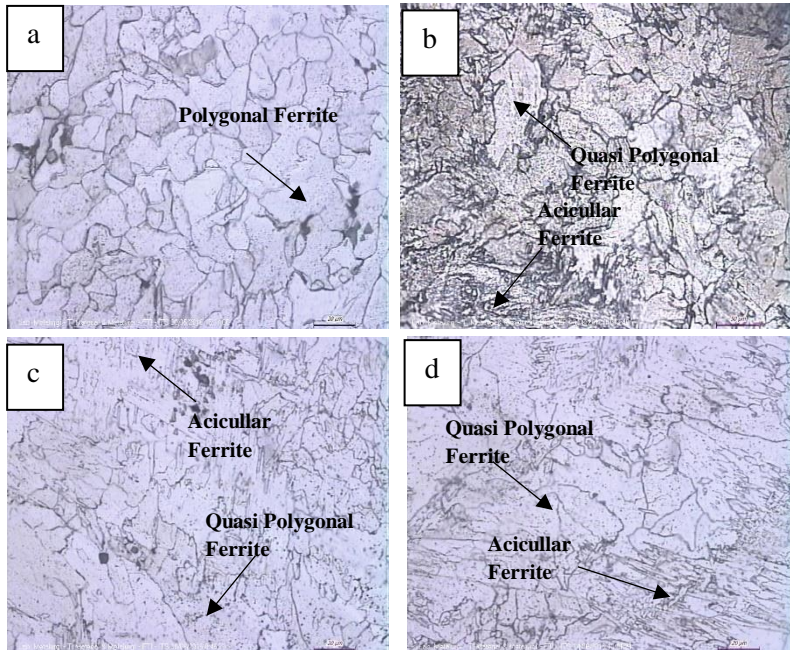


struktur *acicular ferrite* semakin banyak. Jumlah *acicular ferit* yang lebih banyak setelah *post-heat* karena pada saat *post-heat* sampel berada pada temperature tinggi yaitu  $1100^{\circ}\text{C}$ , sehingga butir austenite memiliki kesempatan untuk tumbuh menjadi lebih besar. Peningkatan butir austenite, akan menurunkan fraksi volume dari pembentukan ferrit di batas butir, sehingga apa bila terjadi penurunan temperature mengakibatkan waktu yang kurang untuk pertumbuhan ferrit pada batas butir, akibatnya ferrit primer (*polygonal*) yang terbentuk lebih sedikit dan memperbanyak *acicular ferrite*. (Esmailian.2010)

Hasil pengukuran diameter rata rata ukuran butir dapat dilihat pada gambar 4.11 . Dari gambar terlihat bahwa sampel tanpa *copperizing* memiliki ukuran butir yang paling besar bila dibanding sampel lain. Penambahan waktu *post-heat* terlihat menurunkan diameter rata-rata ukuran butir pada sampel.



**Gambar 4. 11** Grafik diameter ukuran Butir rata rata sampel yang di Aging pada Temperatur  $500^{\circ}\text{C}$



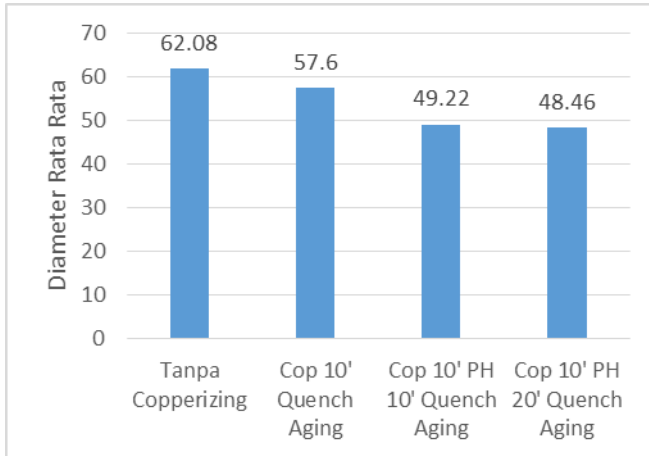
**Gambar 4. 12** Hasil Pengujian Struktur Mikro pada Sampel Variasi Waktu *Post-Heat* yang di- Aging selama 1 jam pada Temperatur 500°C a) Tanpa *Copperizing* b) *Copperizing* 10' b) *Cop* 10'PH 10' c) *Cop* 10' PH 20'

#### 4.3.3 Analisa Hasil Pengamatan Struktur Mikro Sampel Copperizing Variasi Waktu *Post-Heat* yang di-Aging pada Temperatur 600°C

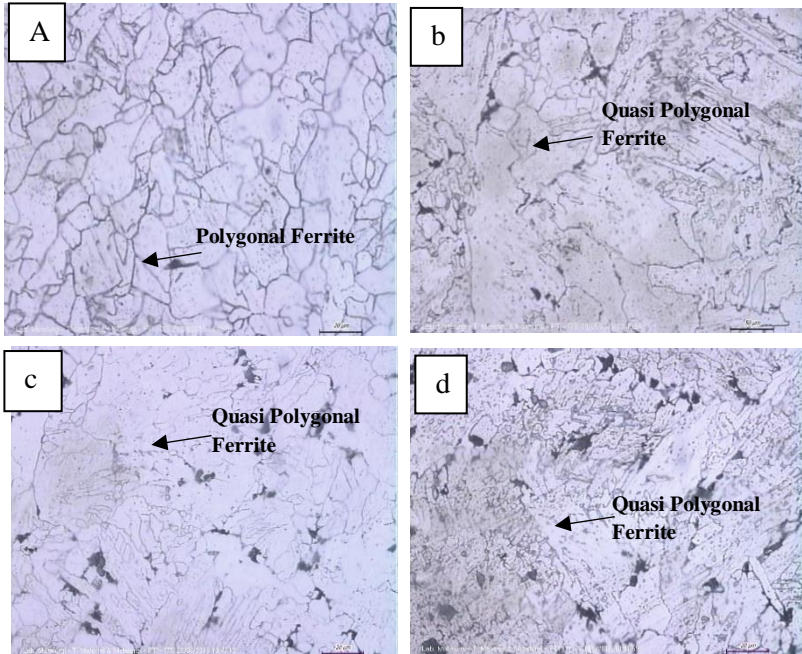
Hasil Pengujian metalografi pada Baja AISI 1006 dengan variasi waktu *post-heat* yang di dinginginkan secara cepat kemudian di-aging pada temperature 600°C terlihat pada gambar 4.14. Gambar 4.14a menunjukkan sampel tanpa copperizing yang



didinginkan secara cepat dengan media air kemudian di aging pada temperature  $700^{\circ}\text{C}$ . Hasil pengamatan pada gambar menunjukkan bahwa struktur yang terbentuk pada sampel dengan perlakuan tersebut adalah struktur berbentuk *polygonal ferrit*. Gambar 4.14b menunjukkan hasil metalografi sampel yang mengalami proses *copperizing* lalu didinginkan secara *quenching*, kemudian diaging pada temperatur  $700^{\circ}\text{C}$ . Pada gambar terlihat adanya perbedaan struktur akibat adanya proses *copperizing* dimana struktur yang terbentuk adalah *quasi-polygonal ferrite* dan *acicular ferrite* pada sampel. Gambar 4.14c menunjukkan hasil metalografi sampel yang mengalami proses *copperizing* selama 10 menit dan di *post-heat* selama 10 menit ,lalu didinginkan secara *quenching*, kemudian diaging pada temperatur  $700^{\circ}\text{C}$  selama 1 jam. Gambar 4.14c juga menunjukkan adanya struktur *quasi-polygonal ferrite*. Gambar 4.14d menunjukkan hasil metalografi sampel yang mengalami proses *copperizing* selama 10 menit dan di *post-heat* selama 20 menit ,lalu didinginkan secara *quenching*, kemudian diaging pada temperatur  $500^{\circ}\text{C}$  selama 1 jam, sama halnya dengan sampel lain yang mengalami proses *copperizing* struktur yang terbentuk pada gambar 4.14d berupa struktur *quasi-polygonal ferrite* dan *acicular ferrit*. Pada gambar 4.14 menunjukkan bahwa sampel hasil *copperizing* seluruhnya memiliki struktur *quasi-polygonal ferrit*. *Acicular ferrit* yang sebelumnya mmuncul pada temperature  $400$  dan  $500^{\circ}\text{C}$  mengalami pertumbuhan menjadi *acicular ferrit* yang lebih kasar, sehingga strukturnya membentuk struktur *quasi-polygonal* yang halus.



**Gambar 4. 13** Grafik diameter ukuran Butir rata rata sampel yang di Aging pada Temperatur 600 °C



**Gambar 4. 14** Hasil Pengujian Struktur Mikro pada Sampel Variasi Waktu *Post-Heat* yang di- *Aging* selama 1 jam pada Tempera tur 600°C a) Tanpa *Copperizing* b) *Copperizing* 10' b) *Cop* 10' *PH* 10' c) *Cop* 10' *PH* 20'

#### 4.3.3 Analisa Hasil Pengamatan Struktur Mikro Sampel *Copperizing* Variasi Waktu *Post-Heat* yang di-*Aging* pada Temperatur 700°C

Hasil Pengujian metalografi pada Baja AISI 1006 dengan variasi waktu *post-heat* yang di dinginginkan secara cepat kemudian di-aging pada temperature 700°C terlihat pada gambar 4.16. Gambar 4.16a menunjukkan sampel tanpa *copperizing* yang didinginkan secara cepat dengan media air kemudian di aging pada

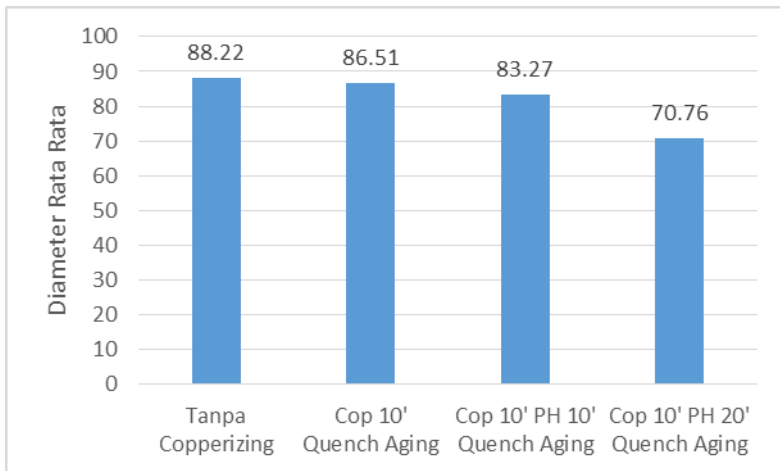


temperature  $700^{\circ}\text{C}$ . Gambar 4.16a menunjukkan menunjukkan bahwa struktur berbentuk polygonal ferrit. Gambar 4.16b menunjukkan hasil metalografi sampel yang mengalami proses *copperizing* lalu didinginkan secara *quenching*, kemudian diaging pada temperatur  $700^{\circ}\text{C}$ . Terlihat adanya perbedaan struktur akibat adanya proses *copperizing* dimana struktur yang terbentuk adalah *quasi-polygonal ferrite* pada sampel. Gambar 4.16c menunjukkan hasil metalografi sampel yang mengalami proses *copperizing* selama 10 menit dan di *post-heat* selama 10 menit, lalu didinginkan secara *quenching*, kemudian diaging pada temperatur  $700^{\circ}\text{C}$  selama 1 jam. Gambar 4.16c juga menunjukkan adanya struktur *quasi-polygonal ferrite*, Gambar 4.16d menunjukkan hasil metalografi sampel yang mengalami proses *copperizing* selama 10 menit dan di *post-heat* selama 20 menit, lalu didinginkan secara *quenching*, kemudian diaging pada temperatur  $700^{\circ}\text{C}$  selama 1 jam, sama halnya dengan sampel lain yang mengalami proses *copperizing* struktur yang terbentuk pada gambar 4.16d berupa struktur *quasi-polygonal ferrite*. Hasil pada gambar 4.16 menunjukkan bahwa seluruh struktur mikro pada sampel yang di-*copperizing* memiliki struktur quasi-polygonal. Struktur quasi-polygonal pada sampel yang di-*aging* di temperatur  $700^{\circ}\text{C}$  memiliki butir yang lebih kasar bila dibandingkan dengan sampel yang di-*aging* pada temperature  $600^{\circ}\text{C}$  akibat pemanasan dengan temperature yang lebih tinggi, sehingga pertumbuhan butir juga semakin besar.

Hasil pengukuran diameter rata rata ukuran butir dapat dilihat pada gambar 4.15 . Dari gambar terlihat bahwa sampel tanpa *copperizing* memiliki ukuran butir yang paling besar bila dibanding sampel lain. Penambahan waktu *post-heat* terlihat menurunkan diameter rata-rata ukuran butir pada sampel.

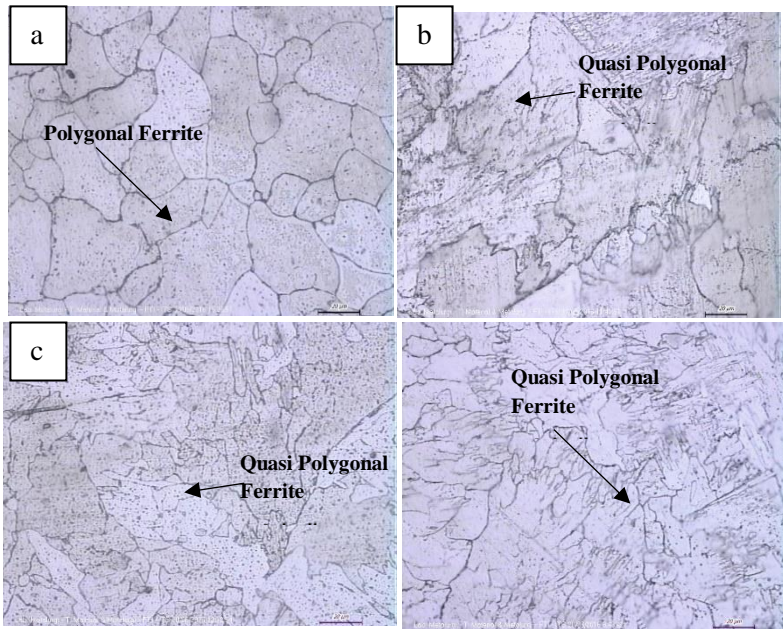


Kenaikan ukuran butir memperlihatkan pertumbuhan ukuran dari quasi-polygonal ferrite pada sampel. Ukuran butir pada sampel yang di aging di temperature ini tidak terlihat perubahan yang begitu signifikan bila dibandingkan dengan temperature lain, hal tersebut dikarenakan pemanasannya berada pada temperature yang tinggi.



**Gambar 4. 15** Grafik diameter ukuran Butir rata rata sampel yang di Aging pada Temperatur 700 °C





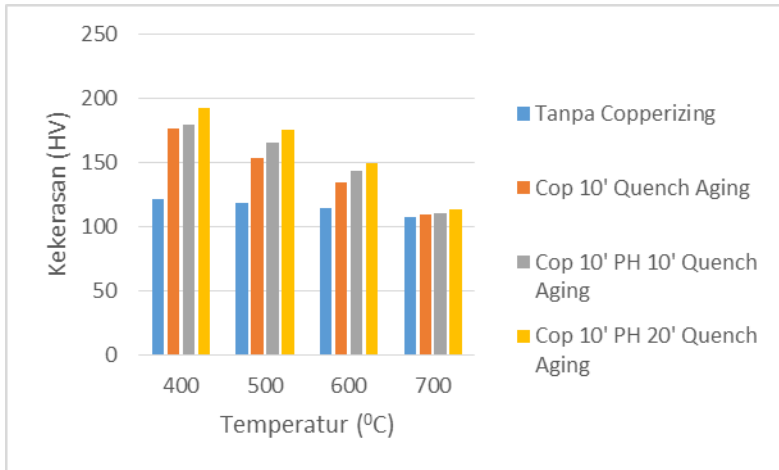
**Gambar 4. 16** Hasil Pengujian Struktur Mikro pada Sampel Variasi Waktu *Post-Heat* yang di- *Aging* selama 1 jam pada Temperatur  $600^{\circ}\text{C}$  a) Tanpa *Copperizing* b) *Copperizing* 10' c) *Cop* 10' *PH* 10' d) *Cop* 10' *PH* 20'

#### 4.4 Hasil Pengujian Kekerasan *Microvickers*

Pengujian *microhardness* dilakukan dengan menggunakan metode *microvickers* dengan beban indentasi sebesar 10gr untuk menguji kekerasan fasa pada masing-masing sampel. Pengujian dilakukan terhadap sampel Baja AISI 1006 dengan variasi waktu *post-heat* yang kemudian diberi pendinginan cepat dengan media



air lalu di-aging pada temperatur 400,500,00, dan 700°C selama 1 jam kemudian didinginkan kembali pada media udara. .



**Gambar 4. 17** Hasil Pengujian *Microhardness* pada Sampel Variasi Waktu *Post-Heat* yang di- Aging selama 1 jam

Gambar 4.17 memperlihatkan bahwa, sampel yang di aging pada temperatur 400°C memiliki nilai kekerasan untuk sampel tanpa *copperizing* sebesar 122.13 HV, pada sampel yang melalui proses *copperizing* kekerasannya mengalami kenaikan menjadi sebesar 176.56 HV, pada sampel yang diberikan perlakuan *copperizing* selama 10 menit lalu diberi *post-heat* selama 10 menit mengalami kenaikan nilai kekerasan menjadi sebesar 180.003 HV, sedangkan untuk sampel yang diberikan proses *copperizing* lalu diberikan *post-heat* selama 20 menit memiliki nilai kekerasan sebesar 192.77 HV. Sampel yang divariasikan waktu *post heat* setelah proses *copperizing*, yang diberikan perlakuan *aging*



pada temperatur  $500^{\circ}\text{C}$  memiliki nilai kekerasan untuk sampel tanpa *copperizing* sebesar 118.653 HV, pada sampel yang melalui proses *copperizing* kekerasannya mengalami kenaikan menjadi sebesar 153.413 HV, pada sampel yang diberikan perlakuan *copperizing* selama 10 menit lalu diberi *post-heat* selama 10 menit mengalami kenaikan nilai kekerasan menjadi sebesar 165.84 HV, sedangkan untuk sampel yang diberikan proses *copperizing* lalu diberikan *post-heat* selama 20 menit memiliki nilai kekerasan sebesar 175.36 HV. Sampel yang divariasikan waktu *post heat* setelah proses *copperizing*, yang diberikan perlakuan *aging* pada temperatur  $600^{\circ}\text{C}$  memiliki nilai kekerasan untuk sampel tanpa *copperizing* sebesar 114.6 HV, pada sampel yang melalui proses *copperizing* kekerasannya mengalami kenaikan menjadi sebesar 134.28 HV, pada sampel yang diberikan perlakuan *copperizing* selama 10 menit lalu diberi *post-heat* selama 10 menit mengalami kenaikan nilai kekerasan menjadi sebesar 158.93 HV, sedangkan untuk sampel yang diberikan proses *copperizing* lalu diberikan *post-heat* selama 20 menit memiliki nilai kekerasan sebesar 150.03 HV. Sampel yang divariasikan waktu *post heat* setelah proses *copperizing*, yang diberikan perlakuan *aging* pada temperatur  $700^{\circ}\text{C}$  memiliki nilai kekerasan untuk sampel tanpa *copperizing* sebesar 107.46 HV, pada sampel yang melalui proses *copperizing* kekerasannya mengalami kenaikan menjadi sebesar 120.633 HV, pada sampel yang diberikan perlakuan *copperizing* selama 10 menit lalu diberi *post-heat* selama 10 menit mengalami kenaikan nilai kekerasan menjadi sebesar 124.33 HV, sedangkan untuk sampel yang diberikan proses *copperizing* lalu diberikan



*post-heat* selama 20 menit memiliki nilai kekerasan sebesar 128.55 HV.

Dari hasil pengujian terlihat bahwa pada sampel yang tidak mengalami proses *copperizing* memiliki nilai kekerasan yang lebih rendah bila dibandingkan dengan sampel yang mengalami proses *copperizing*, hal tersebut dikarenakan adanya pengaruh *copper* sebagai unsur paduan yang dapat mengerser kurva transformasi pendinginan pada baja. Apabila dilihat berdasarkan struktur mikro struktur yang dimiliki oleh baja tanpa *copperizing* merupakan struktur *polygonal ferrite* sedangkan seluruh sampel yang mengalami *copperizing* memiliki struktur *acicular ferrit* dan *quasi-polygonal*. Baja yang mengandung *acicular ferrite* memiliki kekuatan dan kekerasan yang tinggi akibat besarnya dislokasi yang dimilikinya (Niemeier.1980). Pada temperature *aging* yang lebih rendah struktur mikro *acicular ferrite* lebih banyak ditemui, sehingga menyebabkan sampel *copperizing* yang di-*aging* pada temperature paling rendah yaitu 400°C memiliki nilai kekerasan yang paling tinggi dibanding sampel lain. Pada hasil pengujian, terlihat bahwa sampel yang diberikan *post-heat* setelah proses *copperizing* memiliki nilai yang lebih besar dibanding tanpa *post-heat*, dan nilai kekerasannya bertambah seiring dengan bertambahnya waktu *post-heat* yang diberikan. Kekerasan yang meningkat setelah *post-heat* diakibatkan oleh *acicular ferrit* yang lebih banyak pada sampel hasil *post-heat*.

#### 4.5 Hasil Pengujian Tafel

Pengujian Tafel digunakan untuk mengetahui perbedaan laju korosi antara sampel yang mengandung tembaga hasil *Copperizing* dengan sampel yang tidak mengandung tembaga. Software yang digunakan dalam



pengujian ini adalah NOVA, dengan kecepatan pembacaan titik (scan rate) diatur sebesar 0.002 V/detik terhadap potensial korosi. Elektroda bantu (counter electrode) yang digunakan adalah anoda platina.

Dari analisis kurva tafel (gambar 4.20) yang dilakukan, diperoleh parameter elektrokimia berupa nilai  $b_a$  (gradien tafel anodik),  $b_c$  (gradien tafel katodik),  $E_{corr}$  (potensial korosi),  $i_{corr}$  (kerapatan arus korosi), serta laju korosi yang ditunjukkan pada tabel 4.1

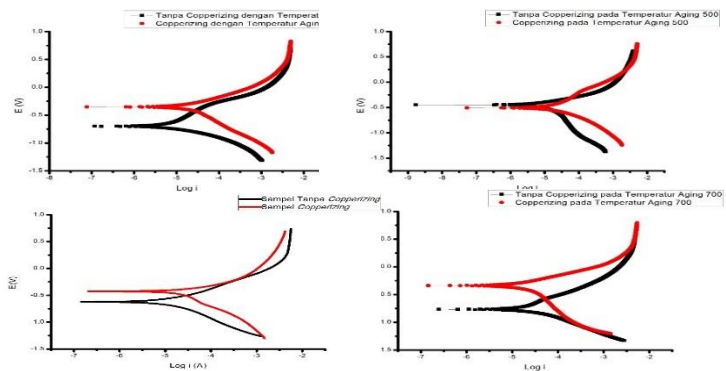
Data pada tabel menunjukkan bahwa laju korosi pada baja dengan *copperizing* mengalami penurunan nilai laju korosi bila dibandingkan dengan sampel yang tidak mengandung tembaga didalamnya. Hal tersebut karena pengaruh dari Cu pada kondisi yang dilakukan dalam penelitian yaitu kondisi yang disesuaikan dengan daerah *industrial*, dengan larutan pada pH 3.8-4.2. Pada proses *copperizing* menghasilkan bagian kaya Cu dipermukaan baja, dalam perlakuan lingkungan yang diberikan pada saat pengujian mengalami pembubaran selektif konstituen lebih aktif, karena akumulasi Cu di permukaan, akumulasi senyawa Cu meningkatkan korosi seragam yang terjadi, korosi seragam yang terjadi pada permukaan menghasilkan senyawa  $Cu_2O$  yang menjadi produk korosi. Lapisan  $Cu_2O$  tersebut memproteksi sampel sehingga tidak terjadi kontak antara baja dengan lingkungan. Lapisan  $Cu_2O$  tersebut terlihat muncul pada hasil XRD sampel korosi, sehingga sesuai dengan turunnya laju korosi yang dialami oleh sampel hasil *copperizing*.

Laju korosi yang dimiliki oleh masing masing sample dapat terlihat pada gambar 4.19

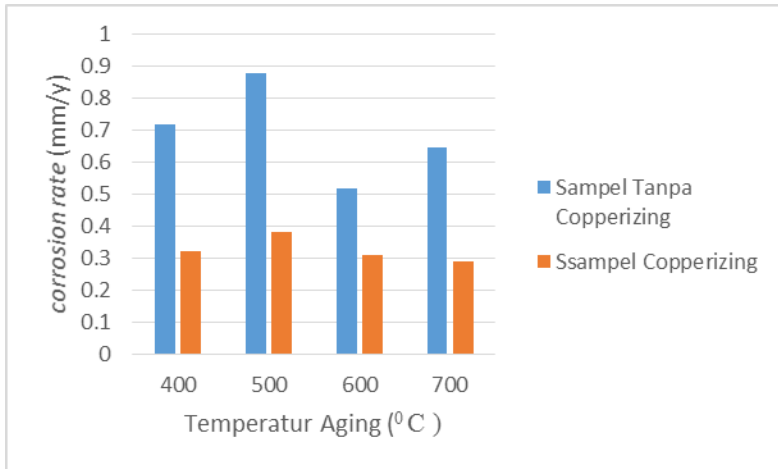


**Tabel 4. 1** Parameter Elektrokimia Hasil Analisis Kurva Tafel

Temperatur Aging (OC)	Perlakuan	Ba (mV/dec)	Bc (mV/dec)	Ecorr (mV)	Icorr ( $\mu$ A)	CR	
						mm/y	mpy
400	Copperizing	165.27	193.8	-364.57	13.81	0.32	12.6
	Tanpa Copperizing	286.4	757.66	-672.37	30.91	0.718	28.28
500	Copperizing	201.87	326.63	-507.13	16.54	0.383	15.08
	Tanpa Copperizing	1455	267.92	-490.45	37.82	0.879	34.1
600	Copperizing	126.53	256.16	-427.32	13.24	0.309	12.07
	Tanpa Copperizing	374.12	213.45	-642.49	22.81	0.52	20.87
700	Copperizing	247.98	198.94	-332.26	12.49	0.29	11.39
	Tanpa Copperizing	278.97	366.03	-765.19	27.7	0.648	25.3



**Gambar 4. 18** Kurva perbandingan Hasil pengujian tafel sampel *copperizing* dan tanpa *copperizing* pada temperature aging (a.) 400<sup>0</sup> C (b) 500<sup>0</sup> C (c) 600<sup>0</sup> C (d) 700<sup>0</sup> C



**Gambar 4. 19** Grafik nilai *corrosion rate* hasil pengujian tafel sampel *copperizing* dan tanpa *copperizing* pada temperature aging (a.)  $400^{\circ}\text{C}$  (b)  $500^{\circ}\text{C}$  (c)  $600^{\circ}\text{C}$  (d)  $700^{\circ}\text{C}$



*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*





## Lampiran 1

### Hasil Peak Pengujian XRD

#### 1. Hasil XRD baja AISI 1006

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
44.6563	487.49	0.0836	2.02926	100.00
64.9553	68.47	0.2007	1.43572	14.04
82.3476	73.89	0.5353	1.17102	15.16

#### 2. Hasil XRD Sampel *Cop 10' Q A 400*

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
10.0676	50.05	0.0502	8.78623	17.72
44.5701	282.47	0.2342	2.03298	100.00
82.2641	47.55	0.5353	1.17200	16.83

#### 3. Hasil XRD Sampel *Cop 10' Q A 400 PH 10'*

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
44.6588	624.55	0.1004	2.02915	100.00
64.9978	87.61	0.5353	1.43488	14.03
82.4261	112.55	0.4684	1.17011	18.02

#### 4. Hasil XRD Sampel *Cop 10' Q A 400 PH 20'*

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
42.9214	52.01	0.4015	2.10717	12.16

44.3438	427.84	0.3011	2.04283	100.00
64.9194	62.01	0.4684	1.43642	14.49
82.3472	74.35	0.4015	1.17103	17.38

#### 5. Hasil XRD Sampel *Cop 10' Q A 500*

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
43.1261	118.07	0.2342	2.09764	45.43
44.5268	259.92	0.3011	2.03486	100.00
50.1998	28.96	0.5353	1.81740	11.14
64.8269	24.31	0.8029	1.43825	9.35
82.2613	43.55	0.4015	1.17203	16.76

#### 6. Hasil XRD Sampel *Cop 10' Q A 500 PH 10'*

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
43.2319	84.48	0.4015	2.09276	10.14
44.6310	833.46	0.3011	2.03035	100.00
50.1998	28.96	0.5353	1.81740	11.14
64.8961	75.64	0.3346	1.43688	9.08
82.4329	122.08	0.4684	1.17003	14.65

#### 7. Hasil XRD Sampel *Cop 10' Q A 500 PH 20'*

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
42.9034	51.35	0.4015	2.10802	20.31

44.2550	252.90	0.2007	2.04672	100.00
50.1788	34.96	0.5353	1.81740	11.14
64.6765	20.92	0.5353	1.44123	8.27
82.0614	38.40	0.4015	1.17438	15.18

#### **8. Hasil XRD Sampel *Cop 10' Q A 600***

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
43.3048	132.61	0.2007	2.08941	53.01
44.6492	250.15	0.1673	2.02956	100.00
50.4149	22.91	0.8029	1.81015	9.16
64.9613	39.81	0.5353	1.43560	15.91
82.2908	67.31	0.4015	1.17169	26.91

#### **9. Hasil XRD Sampel *Cop 10' Q A 600 PH 10'***

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
42.8839	205.28	0.1338	2.10893	84.83
44.4017	241.98	0.1171	2.04030	100.00
50.0790	62.93	0.2676	1.82150	26.00
64.7173	27.05	0.5353	1.44042	11.18
82.3336	30.56	0.4684	1.17119	12.63

#### **10. Hasil XRD Sampel *Cop 10' Q A 600 PH 20'***

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
-----------------	-----------------	----------------------	------------------	------------------

42.8643	47.42	0.8029	2.10985	21.37
44.4683	221.91	0.2007	2.03740	100.00
50.0790	32.87	0.26374	1.82121	26.00
65.0055	25.37	0.8029	1.43473	11.43
82.1422	55.85	0.4015	1.17343	25.17

### 11. Hasil XRD Sampel *Cop 10' Q A 700*

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
43.3004	163.35	0.2676	2.08960	25.11
44.6395	650.55	0.3011	2.02998	100.00
50.3089	40.66	0.4015	1.81371	6.25
65.1657	49.74	0.4015	1.43159	7.65
82.3190	97.88	0.5353	1.17136	15.05
98.8436	70.02	0.4015	1.01503	10.76

### 12. Hasil XRD Sampel *Cop 10' Q A 700 PH 10'*

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
43.2312	305.40	0.0669	2.09279	79.21
44.5736	385.56	0.1171	2.03283	100.00
50.4203	150.84	0.3011	1.80997	39.12
64.9905	47.55	0.4015	1.43502	12.33
74.0508	40.84	0.3346	1.28027	10.59
82.3012	74.39	0.2676	1.17156	19.29

89.9372	48.28	0.4015	1.09087	12.52
98.6921	34.74	0.4015	1.01618	9.01

### 13. Hasil XRD Sampel *Cop 10' Q A 700 PH 20'*

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
43.3238	107.91	0.1004	2.08853	18.21
44.5880	592.68	0.2007	2.03221	100.00
50.4937	26.05	0.6691	1.80751	4.39
65.0140	86.66	0.4015	1.43456	14.62
82.4091	115.21	0.2676	1.17030	19.44
98.6921	34.74	0.4015	1.01618	9.01

### 14. Hasil XRD Sampel Produk Korosi

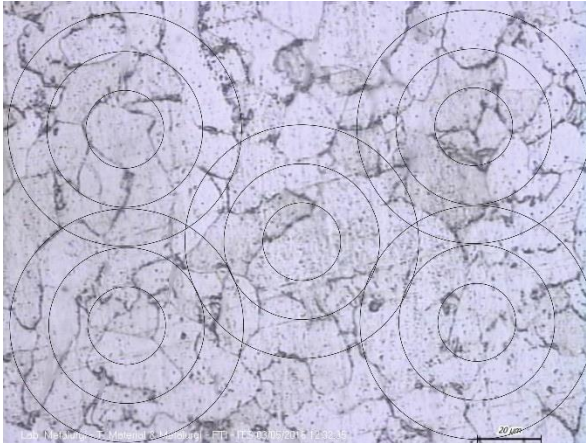
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	Rel. Int. [%]
37.1140	23.51	0.6691	1.12
43.2562	1512.77	0.1020	71.97
43.3808	951.59	0.0612	45.27
44.6122	2102.01	0.1224	100.00
44.7402	1135.48	0.0612	54.02
50.3885	701.56	0.1020	33.38
65.0578	65.64	0.3264	3.12
74.0812	374.01	0.0816	17.79
74.3126	191.22	0.1224	9.10
82.2131	276.50	0.1224	13.15
82.5209	183.61	0.1224	8.74
89.8744	207.76	0.1632	9.88
98.7859	119.38	0.2448	5.68



## Lampiran 2

### Hasil pengukuran Diameter butir rata rata

1. Sampel tanpa Copperizing yg diaging pada temperature 400°C



**Gambar 1** pengukuran diameter ukuran butir sampel tanpa Copperizing yg diaging pada temperature 400° C

**Tabel Hasil Pengukuran diametir Butir**

Pi	PL	$\ell$	G	G Rata-rata	d Rata-rata( $\mu\text{m}$ )
15	15	0.05	5.35 59	5.1257	60.96
17	17.	0.04 7619	5.48 91		
17	17.	0.05 2632	5.20 02		
14	14.	0.06 25	4.70 42		
14	14.	0.05 8824	4.87 92		



2. Sampel tanpa Copperizing yg diaging pada temperature 500°C



Gambar 2 pengukuran diameter ukuran butir sampel tanpa Copperizing yg diaging pada temperature 500°C

Tabel Hasil Pengukuran diametir Butir

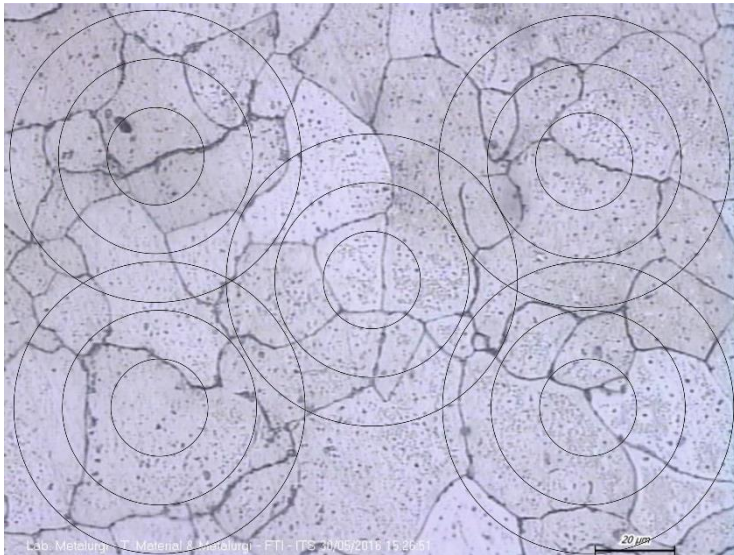
Pi	PL	e	G	G Rata-rata	d Rata-rata(μm)
28	19.0000	0.0526	5.2002	5.0960	61.56
23	17.0000	0.0588	4.8792		
21	20.0000	0.0500	5.3483		
20	16.0000	0.0625	4.7042		
22	20.0000	0.0500	5.3483		

- 
- Lab. Metalurgi - Laboratório de Metalurgia - FIM - UFS 27/04/2016 14:46:02
- 20  $\mu\text{m}$

Tabel Hasil Pengukuran diameter Butir

Pi	PL	e	G	G Rata-rata	d Rata-rata(μm)
20	20.0000	0.0500	5.3483	5.0702	62.08
17	17.0000	0.0588	4.8792		
19	19.0000	0.0526	5.2002		
18	18.0000	0.0556	5.0442		
17	17.0000	0.0588	4.8792		

4. Sampel tanpa Copperizing yg diaging pada temperature 700° C

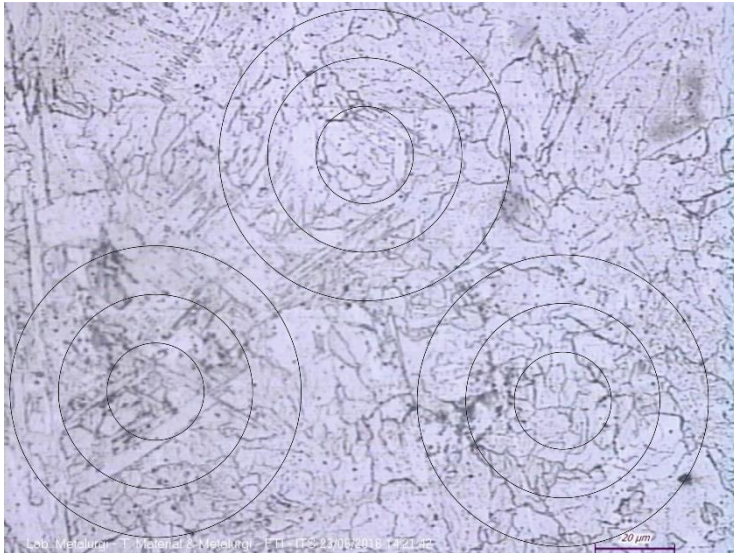


Gambar 4 pengukuran diameter ukuran butir sampel tanpa Copperizing yg diaging pada temperature 700° C

Tabel Hasil Pengukuran diametir Butir

Pi	PL	$\epsilon$	G	G Rata-rata	Rata-rata( $\mu$
12.0000	12.0000	0.0833	3.8739	4.0553	88.22
12.0000	12.0000	0.0833	3.8739		
13.0000	13.0000	0.0769	4.1049		
13.0000	13.0000	0.0769	4.1049		
14.0000	14.0000	0.0714	4.3188		

5. Sampel Copperizing yg diaging pada temperature 400° C

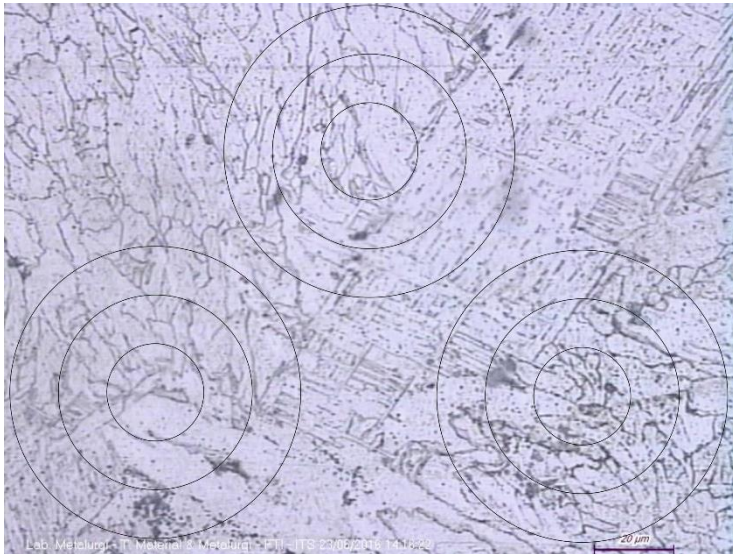


Gambar 5 pengukuran diameter ukuran butir sampel Cop 10' yg diaging pada temperature 400°

Tabel Hasil Pengukuran diametir Butir

c	PL	ℓ	G	G Rata-rata	Rata-rata(μ
28.0000	25.0000	0.0400	5.9923	6.3531	25.69
28.0000	23.0000	0.0435	5.7516		
29.0000	28.0000	0.0357	6.3194		

6. Sampel tanpa Copperizing yg diaging pada temperature 600° C



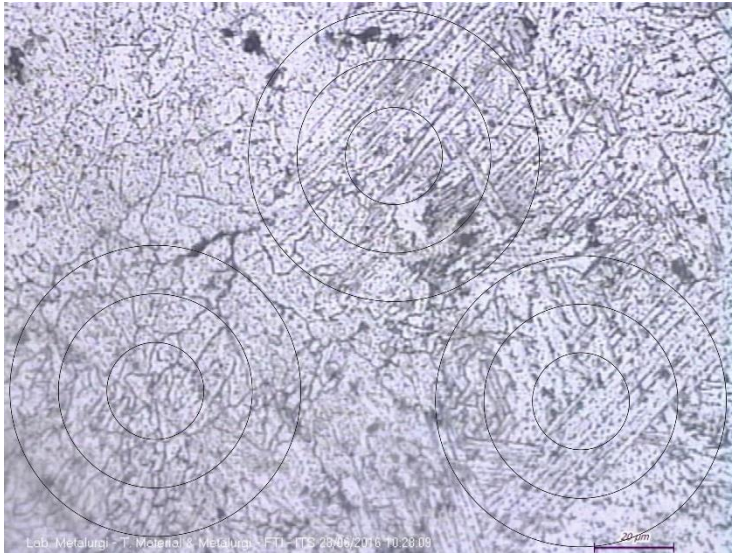
Gambar 6 pengukuran diameter ukuran butir sampel Cop 10'PH10'Q yg diaging pada temperature 400°

Tabel Hasil Pengukuran diametir Butir

Pi	PL	ℓ	G	G Rata-rata	Rata-rata(μ
29.0000	29.0000	0.0400	5.9923	6.6397	18.12
32.0000	32.0000	0.0435	5.7516		
33.0000	33.0000	0.0345	6.4207		



7. Sampel Cop 10' yg diaging pada temperature 600°C



Gambar 7 pengukuran diameter ukuran butir sampel Cop 10'PH20'Q yg diaging pada temperature 400°

Tabel Hasil Pengukuran diameter Butir

Pi	PL	$\epsilon$	G	G Rata-rata	Rata-rata( $\mu$
41.0000	41.0000	0.0400	5.9923	7.3671	9.39
43.0000	43.0000	0.0435	5.7516		
37.0000	37.0000	0.0244	7.4201		

8. Sampel Cop 10' yg diaging pada temperature 600°C



Gambar 8 pengukuran diameter ukuran butir sampel Cop 10' yg diaging pada temperature 500°

Tabel Hasil Pengukuran diametir Butir

Pi	PL	ℓ	G	G Rata-rata	Rata-rata(μ
25.0000	25.0000	0.0400	5.9923	5.8023	47.29
19.0000	19.0000	0.0435	5.7516		
27.0000	27.0000	0.0400	5.9923		

9. Sampel tanpa Cop 10'PH10Q yg diaging pada temperature 500°C



Gambar pengukuran 9 diameter ukuran butir sampel Cop 10'PH10'Q yg diaging pada temperature 500°

Tabel Hasil Pengukuran diametir Butir

Pi	PL	$\ell$	G	G Rata-rata	Rata-rata( $\mu$
19.0000	19.0000	0.0400	5.9923	5.9777	36.78
27.0000	27.0000	0.0435	5.7516		
30.0000	30.0000	0.0526	5.2002		



10. Sampel Cop 10'PH20Q yg diaging pada temperature 500° C

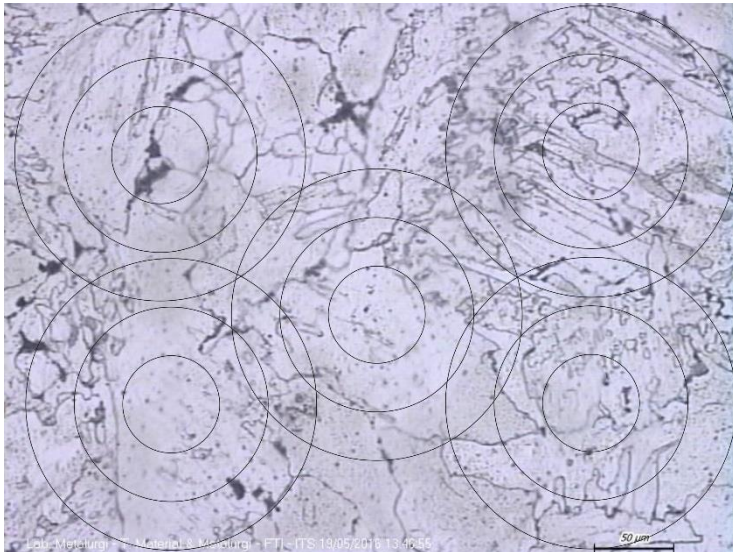


Gambar 10 pengukuran diameter ukuran butir sampel Cop 10' PH20'Q yg diaging pada temperature 500°

Tabel Hasil Pengukuran diametir Butir

Pi	PL	ℓ	G	G Rata-rata	Rata-rata(μ
21.0000	21.0000	0.0400	5.9923	6.2344	27.37
29.0000	29.0000	0.0435	5.7516		
33.0000	33.0000	0.0476	5.4891		

11. Sampel tanpa Cop 10' yg diaging pada temperature 600° C

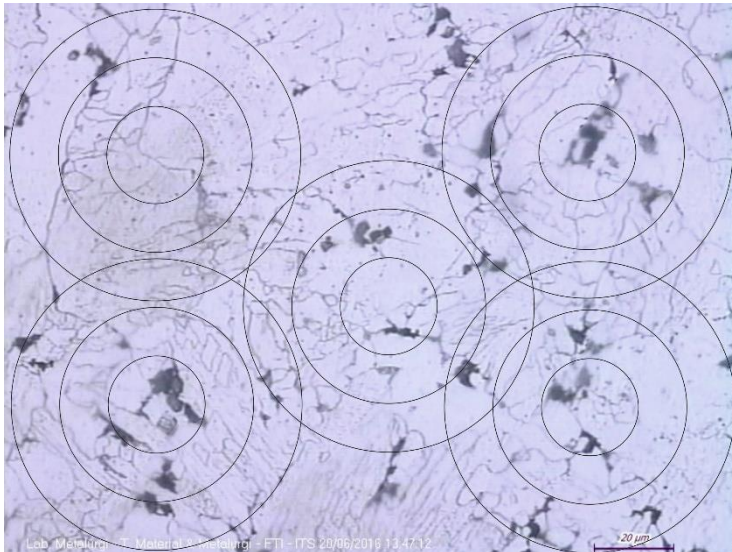


Gambar 11 pengukuran diameter ukuran butir sampel Cop 10' yg diaging pada temperature 600°

Tabel Hasil Pengukuran diametir Butir

Pi	PL	ℓ	G	G Rata-rata	Rata-rata(μ
24.0000	24.0000	0.0400	5.9923	5.3180	57.08
19.0000	19.0000	0.0435	5.7516		
17.0000	17.0000	0.0417	5.8745		

12. Sampel Cop 10'PH10Q yg diaging pada temperature 600° C

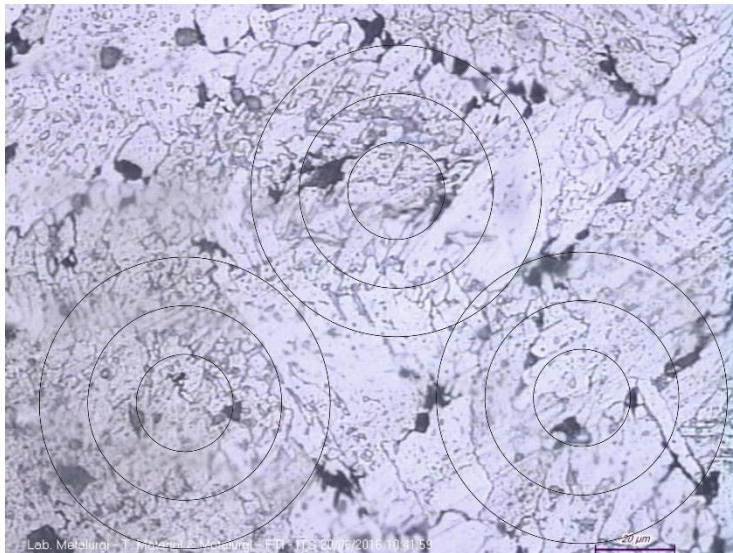


Gambar 12 pengukuran diameter ukuran butir sampel Cop 10'PH10'Q yg diaging pada temperature 600°

Tabel Hasil Pengukuran diametir Butir

Pi	PL	$\bar{x}$	G	G Rata-rata	Rata-rata( $\mu$ )
24.0000	24.0000	0.0400	5.9923	5.7070	49.22
22.0000	22.0000	0.0435	5.7516		
22.0000	22.0000	0.0417	5.8745		

13. Sampel Cop 10'PH20Q yg diaging pada temperature 600° C



Gambar 13 pengukuran diameter ukuran butir sampel Cop 10'PH10Q yg diaging pada temperature 600°

Tabel Hasil Pengukuran diametir Butir

Pi	PL	$\epsilon$	G	G Rata-rata	Rata-rata( $\mu$
25.0000	25.0000	0.0400	5.9923	5.7443	48.46
21.0000	21.0000	0.0435	5.7516		
23.0000	23.0000	0.0400	5.9923		

14. Sampel Cop 10' yg diaging pada temperature 700°C



Gambar 14 pengukuran diameter ukuran butir sampel Cop 10' yg diaging pada temperature 700°

Tabel Hasil Pengukuran diametir Butir

Pi	PL	$\epsilon$	G	G Rata-rata	Rata-rata( $\mu$
19.0000	19.0000	0.0400	5.9923	4.5413	86.51
14.0000	14.0000	0.0435	5.7516		
13.0000	13.0000	0.0526	5.2002		



- 
- 20  $\mu\text{m}$

Tabel Hasil Pengukuran diameter Butir

Pi	PL	$\epsilon$	G	G Rata-rata	Rata-rata( $\mu$ )
17.0000	17.0000	0.0400	5.9923	4.6761	83.27
18.0000	18.0000	0.0435	5.7516		
13.0000	13.0000	0.0588	4.8792		

16. Sampel Cop 10'PH20Q yg diaging pada temperature 700° C



Gambar 16 pengukuran diameter ukuran butir sampel Cop 10'PH10Q yg diaging pada temperature 700°

Tabel Hasil Pengukuran diametir Butir

Pi	PL	$\epsilon$	G	G Rata-rata	Rata-rata( $\mu$
19.0000	19.0000	0.0400	5.9923	5.1975	70.76
18.0000	18.0000	0.0435	5.7516		
20.0000	20.0000	0.0526	5.2002		

**Lampiran 3**  
**Hasil Uji Kekerasan**  
Tabel Hasil Pengujian *microvickers*

Variasi		d1	d2	HV	HV rata rata
Temperatur Aging	Perlakuan				
400	Tanpa <i>Copperizing</i>	12.22	12.78	118.7	122.1333333
		13.08	12.51	113.3	
		11.62	11.87	134.4	
	<i>Cop</i> 10	10.1	10.55	173.94	176.57
		10.16	10.24	178.23	
		10.19	10.25	177.54	
	<i>Cop</i> 10' <i>PH</i> 10'	10.05	10.03	180.9	180.0033333
		10.09	10.13	181.4	
		10.17	10.26	177.71	
	<i>Cop</i> 10' <i>PH</i> 20'	9.53	9.81	198.31	192.77
		9.56	9.91	195.67	
		10.01	10.05	184.33	
500	Tanpa <i>Copperizing</i>	12.3	12.1	124.4	118.6533333
		12.2	13.8	109.2	
		11.8	12.82	122.36	
	<i>Cop</i> 10	11.22	10.9	151.53	153.4133333
		10.71	10.91	158.69	
		10.97	10.42	150.02	
	<i>Cop</i> 10' <i>PH</i> 10'	10.56	10.79	162.73	165.843
		10.67	10.33	168.19	
		10.42	10.68	166.609	
	<i>Cop</i> 10' <i>PH</i> 20'	10.14	10.11	180.9	175.3666667
		10.09	10.13	181.4	
		10.71	10.57	163.8	
600	Tanpa <i>Copperizing</i>	12.14	12.54	122.8	114.6
		12.76	13.25	109.6	
		12.33	13.47	111.4	
	<i>Cop</i> 10	11.74	11.71	134.88	134.28
		11,79	11.83	132.5	
		11.77	11.63	135.46	
	<i>Cop</i> 10' <i>PH</i> 10'	11.11	11.08	150.64	143.6533333
		11.36	11.59	140.83	
		11.87	11.19	139.49	
	<i>Cop</i> 10' <i>PH</i> 20'	11.01	11.23	149.96	150.3033333
		10.66	11.76	147.56	
		11.13	10.56	153.39	
700	Tanpa <i>Copperizing</i>	13.36	13.5	102.7	107.4666667
		12.78	13.2	109.9	
		13.4	12.59	109.8	
	<i>Cop</i> 10	11.7	13.38	117.8	120.6333333
		10.97	13.23	126.7	
		12.61	12.52	117.4	
	<i>Cop</i> 10' <i>PH</i> 10'	11.7	13.38	117.8	124.3366667
		10.97	12.23	137.81	
		12.61	12.52	117.4	
	<i>Cop</i> 10' <i>PH</i> 20'	11.8	12.06	130.29	128.5566667
		11.98	11.89	130.18	
		12.2	12.14	125.2	



Rumus HVN

$$HVN = \frac{1.854,4 P}{d^2}$$

dimana,

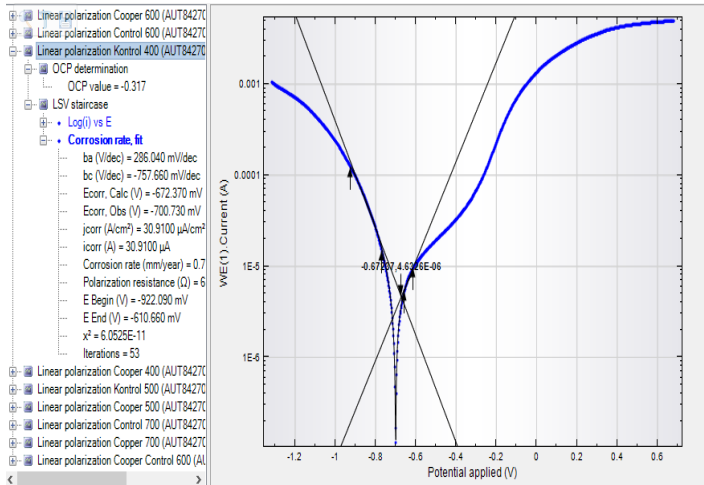
P = gaya yang diberikan (1000gf)

d = diagonal rata-rata (μm)

## Lampiran 4

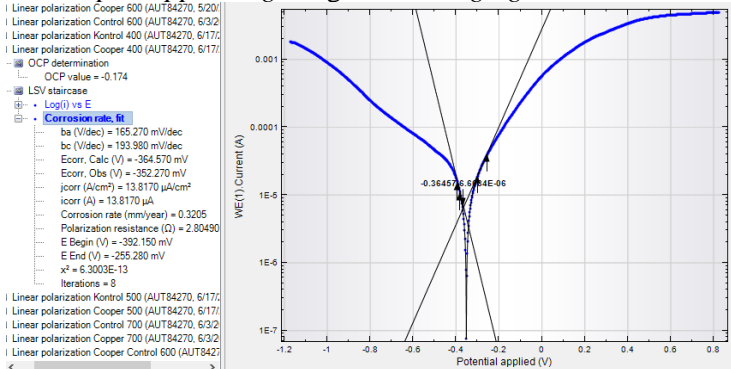
### Hasil Analisa Tafel dengan *Software NOVA*

#### 1. Sampel Tanpa *copperizing* dengan waktu *aging* 400<sup>0</sup> C



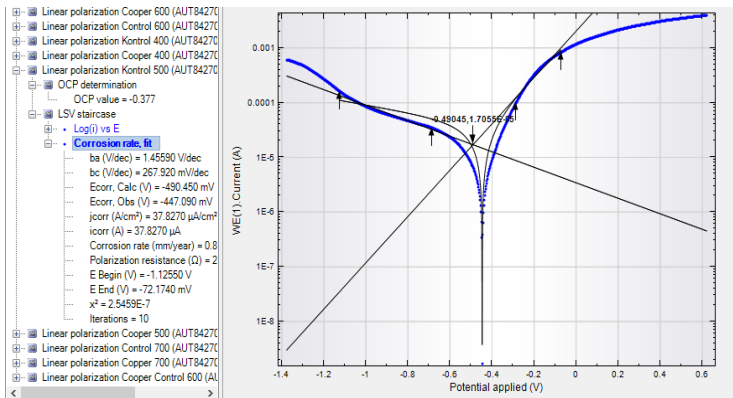
Gambar 17 Analisa Kurva Tafel Sampel Tanpa *copperizing* dengan waktu *aging* 400<sup>0</sup> C dengan software NOVA

#### 2. Sampel *copperizing* dengan waktu *aging* 400<sup>0</sup> C



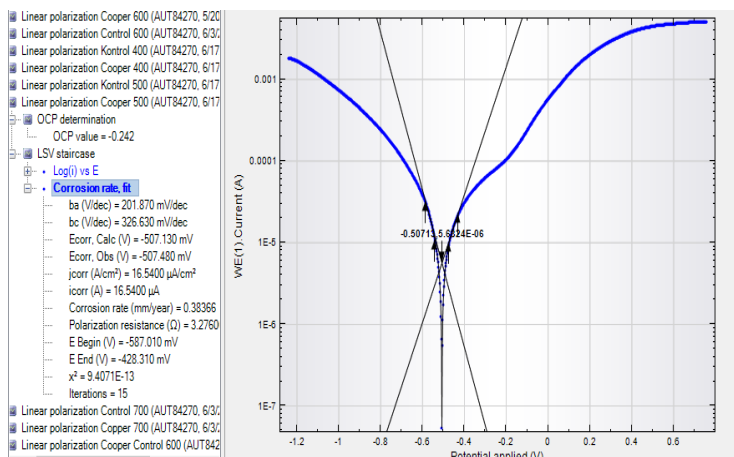
Gambar 18 Analisa Kurva Tafel Sampel Tanpa *copperizing* dengan waktu *aging* 400<sup>0</sup> C dengan software NOVA

### 3. Sampel *copperizing* dengan waktu *aging* 500<sup>0</sup> C



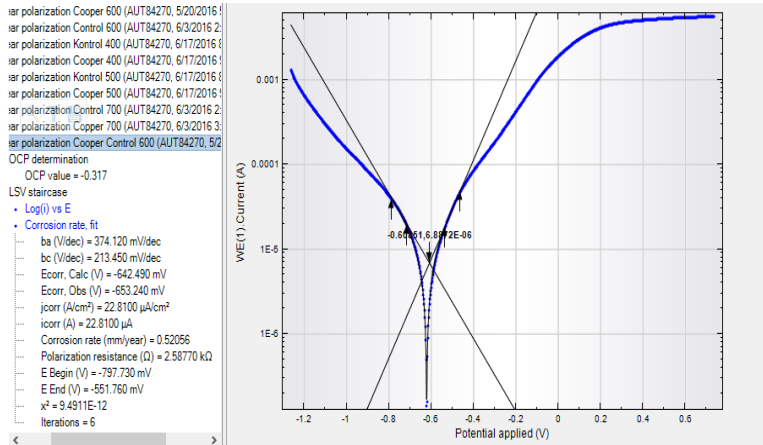
Gambar 19 Analisa Kurva Tafel Sampel Tanpa *copperizing* dengan waktu *aging* 500<sup>0</sup> C dengan software NOVA

### 4. Sampel *copperizing* dengan waktu *aging* 500<sup>0</sup> C



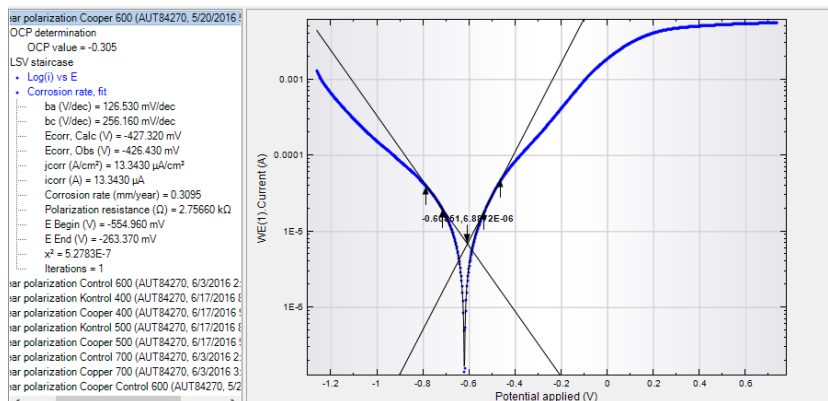
Gambar 20 Analisa Kurva Tafel Sampel *copperizing* dengan waktu *aging* 500<sup>0</sup> C dengan software NOVA

## 5. Sampel *copperizing* dengan waktu *aging* 600<sup>0</sup> C



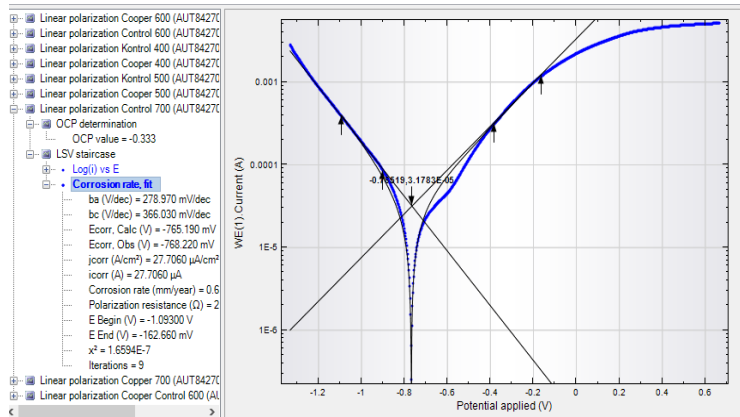
Gambar 21 Analisa Kurva Tafel Sampel Tanpa *copperizing* dengan waktu *aging* 600<sup>0</sup> C dengan software NOVA

## 6. Sampel *copperizing* dengan waktu *aging* 600<sup>0</sup> C



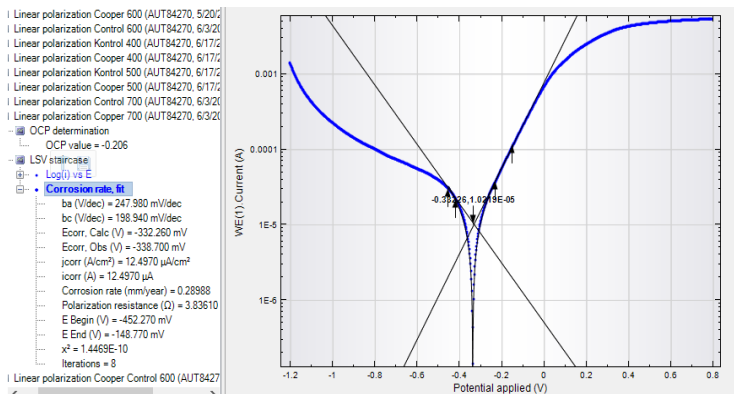
Gambar 22 Analisa Kurva Tafel Sampel *copperizing* dengan waktu *aging* 600<sup>0</sup> C dengan software NOVA

## 7. Sampel *copperizing* dengan waktu *aging* 700<sup>0</sup> C



Gambar 23 Analisa Kurva Tafel Sampel Tanpa *copperizing* dengan waktu *aging* 700<sup>0</sup> C dengan software NOVA

## 8. Sampel *copperizing* dengan waktu *aging* 700<sup>0</sup> C



Gambar 24 Analisa Kurva Tafel Sampel *copperizing* dengan waktu *aging* 700<sup>0</sup> C dengan software NOVA



## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa :

1. Struktur mikro baja yang mengalami *copperizing* memiliki perubahan dimana strukturnya berupa *quasi-polygonal ferrite* dan *acicular ferrite*, berbeda dari sampel tanpa *copperizing* yang hanya memiliki struktur *polygonal ferrite*. Semakin lama waktu *post-heat* yang diberikan membuat *acicular* ferrit yang terdapat pada baja semakin banyak. Peningkatan temperature aging menunjukkan adanya pertumbuhan butir sehingga semakin tinggi temperature *aging* maka semakin sedikit *acicular ferrit* yang ada pada baja dan strukturnya cenderung *quasi-polygonal*.
2. Proses *copperizing* meningkatkan kekerasan pada sampel. Struktur *acicular ferrite* pada baja meningkatkan nilai kekerasan, semakin lama waktu *post-heat* yang diberikan membuat semakin banyaknya *acicular ferrit*. Temperatur *aging* yang semakin tinggi menurunkan nilai kekerasan akibat pertumbuhan butir. Kenaikan kekerasan akibat penambahan waktu *post-heat* juga sesuai dengan penurunan diameter ukuran butir rata-rata. Nilai kekerasan tertinggi didapatkan pada sampel dengan *copperizing* pada temperature 400°C dan waktu *post-heat* 20 menit yaitu sebesar 192.77 HV. Kenaikan kekerasan akibat penambahan waktu *post-heat* juga sesuai dengan penurunan diameter ukuran butir rata-rata.
3. Ketahanan korosi baja AISI 1006 yang diberikan proses *copperizing* lebih tinggi akibat adanya pembentukan Cu<sub>2</sub>O pada permukaan akibat kandungan Cu pada permukaan sampel hasil *copperizing*



## 5.2 Saran

Adapun beberapa saran yang dapat dipertimbangkan terkait metode *copperizing* ini untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Menggunakan Cu dengan kualitas yang baik setiap kali melakukan proses *copperizing*.
2. Melakukan pembersihan terhadap *crucible grafit* yang dipakai setiap proses selesai.





## DAFTAR PUSTAKA

- \_\_\_\_\_. 1990. **ASM Metals Handbook Vol 1 10<sup>th</sup> Edition: Properties and Selection Irons, Steels, and High Performance Alloys**. Ohio: ASM International.
- \_\_\_\_\_. 1992. **ASM Metals Handbook Vol 2 10<sup>th</sup> Edition: Properties and Selection Non-Ferrous Alloys and Special Purpose Mate**. Ohio: ASM International.
- Ahmad, Zaki. 2006. **Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control**. Saudi Arabia : Elsevier Science & Technology Books
- Astuti, Indri. 2008. **Studi Pengaruh Kadar Kromium Terhadap Kekerasan Lapisan Hasil Hot Dip Galvanizing Pada Baja dari Spons Bijih Besi Laterit**. Indonesia : FT-UI
- Banadkhokui, Sayed Sadegh. 1996. **Transformation Characteristic and Structure-Properties Relationship of Copper Bearing HSLA steel**. Wollongong: University of Wollongong
- Bhardwaj, P . **Handbook on Steel, Wires, Bars, SS Sheert Production owith Ferrous Metal Casting & Processing**. NPCS : India
- Bondan, T. Sofyan. 2010. **Pengantar Teknik Material**. Jakarta: Salemba Teknika.
- Bramfitt, B.L. 2002. **Metallographer's Guide: Practice and Procedures for Irons and Steels**. USA: ASM International
- Butrymowicz, D.B. 1976. **Diffusion Rate Data and Mass Transfer Phenomena for Copper System**. New York : International Copper Research Association
- Callister, William D., dan David G. Rethwisch. 2000. **Material Science and Engineering and Introduction**. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Cunika, Aprida U. 2015. **Pengaruh Short Immersing Time dan Laju Pendinginan Proses Copperizing Terhadap**

**Perubahan Mikrostruktut dan Perilaku Tembaga Pada Dead Mild Steel.** Surabaya : ITS

- Dieter, G. E. 1997. **Introduction to Physical Metallurgy 2<sup>nd</sup> Edition.** New Delhi: McGraw Hill.
- Durand, Madeleine; Charre. 2003. **Microstructure of Steels and Cast Irons.** Paris: Springer
- Easterling, K.E. 2009. **Phase Transformation in Metal and Alloys.** New York : CRC Press.
- Elwazri, dkk. 2007. **Analysis of Copper Effect on Microstructure and Mechanical Properties in Microalloyed Steels.** ISIJ Internasional, 48: 107-113.
- Esmailian, M.2010. **The Effect of Cooling Rate And Austenite Grain Size on the Austenite to Ferrite Transformation Temperature and Different Ferrite Morphologies in Microalloyed Steel.** ISIJ Internasional, 48: 107-113
- Fontana, Mars Guy. 1986. **Corrosion Engineering.** New York :Mc Graw-Hill
- Hasa, M.Husna, 2007, “**Formasi Fasa dan Mikrostruktur Bahan Struktur paduan Aluminium Fero-Nikel Hasil Proses Sintesis**”, Yogyakarta, Pustek Akselerator dan Proses Bahan-BATAN;ISSN 0216-3128
- Higgins, Raymond A. 1993. **Engineering Metallurgy Part 1 Applied Physical Metallurgy Sixth Edition.** Britain: Arrowsmith Ltd.
- Hu, Wei. 2008. **Data-driven Metallurgical Design for High Strength Low Alloy (HSLA) Steel.** Graduate Theses and Dissertations, Iowa State University
- Jang, Young Wook.2009. **Effects of Copper on the Corrosion Properties of Low-Alloy Steel in an Acid-Chloride Environment.** New york : Springer
- Krauss, George. 2015. **Steels: Processing, Structure, and Performance, Second Edition.** United States of Amerika: ASM International
- Khurmi, R.S.; J.K. Gupta. 2005. **A Textbook of Machine Design.** New Delhi: Eurasia Publishing House (PVT.) LTD

- Konecna, L. 2012. **Determination of Eigenfrequencies of Steel Cylindrical Storage Tank**. New York: Scientificnet
- Martienssen, Werner. 2008. **Springer Handbook of Condensed Matter and Materials Data**. Germany : Springer
- Mihaela, Pascu. 2001. **Practical Guide to Polyethylene**. Shrewsbury: Rapra Tech.
- Moline, K., dkk. 2002. **Effect of Copper in High Strength Low Alloy Steel**. Colorado: School Of Mines.
- Morris, J.W. 2012. **The Influence of Grain Size on Mechanical Properties of Steel**. <URL: <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/861397/>>
- Mujahid, M., dkk. 1997. **HSLA-100 Steels: Influence of Aging Heat Treatment on Microstructure and Properties**. Ohio: ASM Internastional.
- Niemeier, B.A. 1980. **Formability Topics Metallic-Materials**. New York: ASTM
- Porter, D.A., dan K.E. Easterling. 1992. **Phase Transformation in Metals and Alloys 2<sup>nd</sup> Edition**. India: Chapman & Hall.
- Priatma, Aji. 2010. **Pengaruh Temperatur Quench Terhadap Laju Korosi dan Struktur Mikro Hasil Pengelasan Baja Keylos 50**. UNS:Surakarta
- Ray, P.K. 2003. **Optimization of Mechanical Properties of Heat Treated HSLA 80 Steel**. New Delhi: National Institute of Technology
- Sadegh, Sayed. 1996. **Transformation Characteristics and Structure-Property Relationship for a Copper Bearing HSLA**. Australia: University of Wollongong
- Suherman, Wahid. 2003. **Ilmu Logam I**. Surabaya: ITS.
- Suherman, Wahid. 2001. **Perlakuan Panas**. Surabaya: ITS.
- Sulistijono. 1999. **Diktat Kuliah Korosi**. Surabaya: Fakultas Teknologi Industri ITS
- Surdia, Tata dan Shinroku Saito, 1999, **Pengetahuan Bahan Teknik**, Jakarta, Pradnya Paramita.

- Taufiq, Tania, dan Akhmad A. Korda. 2010. **Studi Pengaruh Temperatur Aging dan Orientasi Butiran Terhadap Sifat Mekanik Paduan Al 2014**. JTM XVII, 3:161-170.
- Thelning, Karl-Erik.1984.**Steel and Its Heat Treatment: Bofors Handbook**. England: Fakenham Press Ltd.
- Totten, George. E. 2006. **Steel Heat Treatment Handbook 2<sup>nd</sup> Edition**. New York: Taylor&Francis.
- Vicky, Widia Anggia. 2015. **Pengaruh Temperatur solution treatment dan aging terhadap struktur mikro dan kekerasan copperized-AISI 1006**. Surabaya: ITS
- Weng, Yuqing. 2008. **Ultra-fined Grained Steel**.Springer: China
- Wilson, A. D.; E. G. Hamburg, dkk. 1987. **Properties and Microstructures of Copper Precipitation Aged Plate Steels**. 8811-006 USA
- Zhou, W.H., dkk. 2014. **Copper Precipitation and its Impact on Mechanical Properties in A Low Carbon Microalloyed Steel Processed b Three-Step Heat Treatment**. Materials and Design 63:42-49.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Praditha Diksi Askara yang dilahirkan di Sukabumi pada tanggal 28 Desember 1994. Penulis telah menyelesaikan pendidikan formal di SD Kebon Pedes 1, lalu melanjutkan Ke SMP Negeri 1 Bogor, Setelah itu penulis melanjutkan sekolah ke SMA Negeri 3 Bogor. Penulis kemudian menjadi mahasiswa aktif Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS pada tahun 2012.

Sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTIS-ITS penulis pernah aktif dalam beberapa organisasi kemahasiswaan yaitu sebagai Staff Divisi Keprofesian Perhimpunan Mahasiswa Metalurgi dan Material se-Indonesia, serta sebagai Kepala Departemen Dalam Negeri HMMT FTI-ITS. Penulis melakukan penelitian yang kemudian dijadikan tugas akhir dengan judul **“Pengaruh Tempetatur Aging Dan Waktu Tahan *Post-Heat* Pada Proses *Copperizing* Terhadap Kekerasan, Ketahanan Korosi , Serta Struktur Mikro Baja AISI 1006.”** Saat ini penulis beralamat di Jl. Sutorejo Selatan VIII No. 23 Mulyosari Surabaya